

Universidade Federal de
Santa Catarina

Programa de Pós-
Graduação em
Engenharia Civil

www.pgpec.
posgrad.ufsc.br

Campus Universitário
Trindade

Florianópolis- SC

Tese apresentada ao Programa de Pós-
graduação em Engenharia Civil, Departamento
de Engenharia Civil, do Centro Tecnológico da
Universidade Federal de Santa Catarina, como
requisito para obtenção do Título de Doutor em
Engenharia Civil

Orientador: Enedir Ghisi

Florianópolis, 2014

Benefícios ambientais da preservação do patrimônio edificado
Ulisses Munarim

Benefícios ambientais da preservação do
patrimônio edificado:
Análise do ciclo de vida da reabilitação de
edificações vs. nova construção

Ulisses Munarim

A reabilitação arquitetônica envolve a readequação de edifícios existentes de maneira a atender a normas e padrões de conforto e utilização mais atuais. É também uma oportunidade ímpar de alçar essas edificações a níveis superiores de desempenho ambiental. Quando justaposta a políticas de preservação de edifícios dotados de significado histórico ou cultural, a reabilitação arquitetônica ainda retém e promove um importante capital social: a memória construída. A possibilidade de incorporar o valor ambiental traz novas alternativas à preservação desse patrimônio.

Orientador:

Enedir Ghisi



Universidade Federal de Santa Catarina
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil

Ulisses Munarim

**BENEFÍCIOS AMBIENTAIS DA PRESERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO
EDIFICADO:**

**Análise do ciclo de vida da reabilitação de edificações vs.
nova construção**

Tese submetida ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Civil da Universidade Federal de
Santa Catarina como parte dos
requisitos para a obtenção do
Grau de Doutor em Engenharia
Civil.

Orientador: Prof. Enedir Ghisi,
PhD.

Florianópolis
2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca
Universitária da UFSC.

Munarim, Ulisses

Benefícios ambientais da preservação do patrimônio
edificado : Análise do ciclo de vida da reabilitação
de edificações vs. nova construção / Ulisses Munarim ;
orientador, Eneidir Ghisi - Florianópolis, SC, 2014.
290 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Patrimônio edificado. 3.
Reabilitação arquitetônica. 4. Impactos ambientais. 5.
Análise de ciclo de vida. I. Ghisi, Eneidir. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Ulisses Munarim

BENEFÍCIOS AMBIENTAIS DA PRESERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO
EDIFICADO: Análise do ciclo de vida da reabilitação de edificações vs. nova construção

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de “Doutor em Engenharia Civil”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Florianópolis, 7 de novembro de 2014.

Prof. Roberto Carlos de Andrade Pinto, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Eneir Ghisi, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina Orientador

Prof.ª Cláudia Naves David Amorim, Dr.ª
Universidade de Brasília

Prof.ª Denise Helena Silva Duarte, Dr.ª
Universidade de São Paulo

Prof. Sebastião Roberto Soares, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Roberto Lamberts, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.ª Ana Ligia Papst de Abreu, Dr.ª
Instituto Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Uma pesquisa de doutorado jamais resulta de um trabalho individual e, mesmo sob o risco de cometer algumas imperdoáveis omissões, eu não poderia deixar de registrar aqui o meu agradecimento a algumas pessoas em especial.

Agradeço inicialmente ao prof. Enedir Ghisi, pela orientação sempre precisa e presente – mesmo quando à distância – e pela valiosa contribuição à minha formação no estágio de docência e em metodologia da pesquisa. Mas, sobretudo, sou grato por sua disposição em orientar e participar de um trabalho afeito a outras áreas do conhecimento. Se a interdisciplinaridade é uma tendência na pesquisa, sua real efetivação ainda encontra uma série de barreiras individuais na academia.

No meu percurso acadêmico no doutorado também foram de grande importância os professores Sebastião Roberto Soares e Roberto Lamberts, aos quais sou muito grato. O professor Soares me introduziu nos universos da análise de ciclo de vida e da análise multicritério, e demonstrou que é possível utilizar métodos qualitativos na pesquisa em engenharia. O professor Lamberts nunca deixou de compartilhar seus conhecimentos em simulação termoeenergética de edificações e em políticas públicas de eficiência energética. Agradeço também às professoras Cláudia Naves David Amorim, Denise Helena Silva Duarte e Ana Ligia Papst de Abreu que, em conjunto com os professores Soares e Lamberts, compuseram minha banca de doutorado e participaram da avaliação desta tese.

Agradeço aos colegas pesquisadores que foram fundamentais no desenvolvimento deste trabalho: a engenheira Ariadne Marques de Mendonça, pelo auxílio com as TCPO, pela troca constante de referências e pela parceria nos artigos para revistas e congressos; ao arquiteto Márcio José Sorgato, por todo o apoio com as simulações termoeenergéticas; o engenheiro Guilherme M. Zanghelini, pelo suporte na temática da análise de ciclo de vida e na utilização do *SimaPro*; ao arquiteto Tiago Tamanini Jr., que se envolveu ativamente em diversas etapas do trabalho e foi um parceiro indispensável. Estendo também minha gratidão aos colegas de LabEEE, sempre valiosos interlocutores, sem deixar de

mencionar especialmente os engenheiros Ricardo Rupp e Ana Kelly Marinoski e os arquitetos Rogério Versage, Cláudia Donald Pereira, Clarissa Debiazi Zomer, Maria Andrea Triana Montes, Miguel Teixeira Gomes Pacheco e Renata De Vecchi. As professoras France Vanlaethem e Soraya Bassil sempre serão lembradas pelo carinho com que me receberam na *École de design* da *Université du Québec à Montréal*, e o professor Roberto Carlos de Andrade Pinto, coordenador do PPGE, por ter tornado possível este intercâmbio.

O método proposto nesta pesquisa não poderia ter sido desenvolvido sem a contribuição dos profissionais que integraram o painel de especialistas, os arquitetos Ricardo Socas Wiese, Isabel Kanan, Roberto Marquetti dos Santos e Vanessa Maria Pereira; os engenheiros Edward Borgstein, Mário Alves do Rosário Pires, Olavo Kucker Arantes e Andreza Kalbusch, assim como o bacharel Tiago Barreto Rocha. Sou grato a todos, assim como à arquiteta Cristiane Biazin, do IPHAN/SC, que, mesmo sem integrar o painel, foi uma das especialistas mais consultadas para este trabalho, e o professor Luiz Eduardo Fontoura Teixeira e os arquitetos André Luis de Lima e Guilherme Freitas Grad, parceiros nas pesquisas sobre preservação do patrimônio moderno. A realização do exemplo de aplicação do método proposto só foi possível com o apoio dos servidores do DEINFRA/SC, em especial as arquitetas Andrea Marques Dal Grande e Cláudia Fantazzini Russi, e o engenheiro Serafim Renato de Lemos; assim como o engenheiro Felipe Lion, da empresa ACV Brasil, que gentilmente cedeu as licenças de uso do *software* SimaPro e da base de dados *ecoinvent*.

Agradeço a CAPES (Fundação e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de pesquisa fornecida para o desenvolvimento da tese.

Por fim, e acima de tudo, agradeço à minha família todo o suporte ao longo desses mais de quatro anos. Meus pais, Antonio e Zélia, e meus irmãos, Iracema e Aquiles, sempre presentes mesmo nos momentos em que enfrentavam dificuldades. Minha amada Renata, por tudo (sobretudo pela paciência). Meus sogros Bellini e Walkiria, e meus tios Zilma e José Luis, sábios conselheiros. Meus cunhados Rogério, Gabriela, Lucas e, Fernanda, marinheiros no mesmo barco, e Mariana, agente de viagens em tempo integral.

*The most environmentally benign
building is the one that
does not have to be built
(IEA ANNEX 31, 2001a).*

*Old ideas can sometimes use new
buildings.
New ideas must use old buildings
(JACOBS, 1992).*

RESUMO

A construção de edificações é uma atividade responsável por inúmeros prejuízos ao meio ambiente, e as condições do parque edilício atual não contribuem para a mitigação de suas repercussões ambientais. A requalificação do parque edilício, por meio da reabilitação de edificações antigas, configura-se como uma alternativa viável para a redução dos impactos ambientais provocados pelo setor, uma oportunidade ímpar de alçar essas edificações a níveis superiores de desempenho ambiental, reduzindo, sobretudo, o consumo de energia para sua operação. A reabilitação é uma abordagem apropriada para a revalorização e prolongamento da vida útil das arquiteturas do passado recente, como aquelas do Movimento Moderno. A possibilidade de incorporar o valor ambiental traz novas alternativas à preservação desse patrimônio, privado, pelo senso comum, de historicidade e legitimação. O objetivo deste trabalho é desenvolver um método, utilizando análise de ciclo de vida e baseado no conceito de impacto ambiental evitado, para avaliar a viabilidade ambiental da reabilitação de edificações com foco na eficiência energética. O método visa estabelecer diretrizes para orientar análises comparativas entre as possibilidades de se reabilitar uma edificação antiga ou de demoli-la e construir uma nova em seu lugar. O desenvolvimento do método compreendeu a elaboração de um modelo conceitual para a análise comparativa; a realização de um exemplo de aplicação, no qual foi avaliado o desempenho de uma edificação modernista de Florianópolis, SC; e a avaliação das premissas adotadas no modelo conceitual por um painel de especialistas, onde as opiniões de um grupo de profissionais de diferentes áreas foram coletadas por meio de questionários. No método proposto, a demolição de edificação existente é considerada apenas para a definição do marco de referência: o cenário com nova construção. O cenário com nova construção é representado por um modelo de edificação teórica, parametrizado com referenciais estatísticos dos padrões construtivos e de desempenho atuais, atendendo critérios de comparabilidade com a edificação existente. No cenário com reabilitação, são avaliadas diferentes medidas de conservação de energia no edifício existente. Foi empregada a simulação computacional termoenérgica na estimativa do consumo de energia para a operação das edificações. O inventário

de ciclo de vida utiliza bases de dados internacionais avalizadas. A aplicabilidade de diferentes métodos de avaliação de impacto de ciclo de vida foi discutida no painel de especialistas, considerando indicadores como demanda energética acumulada, pegada ecológica, danos à saúde humana, à diversidade dos ecossistemas e à disponibilidade de recursos abióticos. A viabilidade ambiental da reabilitação foi avaliada a partir da comparação dos impactos ambientais acumulados ao longo do ciclo de vida analisado para os cenários com reabilitação e com nova construção. De forma geral, o método proposto foi avalizado pelo painel de especialistas enquanto instrumento de apoio à decisão. No exemplo de aplicação, confirmou-se a expectativa de que os efeitos ambientais relacionados ao consumo de energia para a operação das edificações seriam os mais significativos, embora a introdução de medidas de conservação de energia nem sempre se justifique do ponto de vista ambiental. No balanço final do exemplo de aplicação do método, em relação à nova construção a reabilitação seria ambientalmente viável em todos os métodos de análise de impacto de ciclo de vida empregados nas comparações.

Palavras-chave: patrimônio edificado; reabilitação arquitetônica; impactos ambientais; análise de ciclo de vida.

ABSTRACT

The construction of buildings is an activity responsible for several environmental impacts. The environmental consequences of the building stock operation are also considerable, particularly regarding the energy consumption. In this context, the building stock requalification through rehabilitation of existing buildings can be a realistic alternative to reduce the environmental impacts caused by the construction industry. Rehabilitating a building is a unique opportunity to reach higher levels of environmental performance and especially to reduce the energy required for its operation. Rehabilitation is also an appropriate approach to revitalize and extend the lifespan of the recent past built heritage, such as those of the Modern Movement. The ability to demonstrate the environmental benefits in conserving buildings of cultural value brings new alternatives to preserve that heritage, deprived by common sense of historicity and legitimacy. The prospect of environmental indicators to evaluate the feasibility of architectural rehabilitation has been the focus of interest in this research, finding that the concept of avoided environmental impact is a relevant approach. The objective of this work is to develop a method, using life cycle analysis and based on the concept of avoided environmental impact, to assess the environmental feasibility of rehabilitation with focus on energy efficiency. In the proposed method, the feasibility of rehabilitation can be determined from the comparison between the environmental impacts involved in the rehabilitation and use of an existing building and those arising from the demolition of this building followed by the construction and use of a new equivalent building. The method proposed involved the development of a conceptual model for the comparative analysis; the completion of an application example, in which the environmental performance of a modern building from Florianópolis, SC, were evaluated; and the evaluation of the assumptions made in the conceptual model by a panel of experts, where the opinions of a group of professionals from different fields were collected through questionnaires. In the proposed method, the demolition of existing building is considered only to define the benchmark: the new construction scenario. The new construction scenario is represented by an archetype, parameterized with statistical data from local current construction standards, and

meeting criteria for comparability with the existing building. In the rehabilitation scenario, different possibilities of implementing energy conservation measures in the existing building are evaluated. Building energy simulation was employed to estimate the energy consumption for the operation of buildings. The lifecycle inventory uses endorsed international databases. The applicability of different methods of impact assessment of the life cycle was evaluated by the expert panel considering indicators such as cumulative energy demand; ecological footprint; and human health, ecosystem diversity and availability of abiotic resources damages. The environmental feasibility of rehabilitation was assessed from the comparison of the environmental impacts accumulated over the life cycle for rehabilitation and new construction scenarios. In general, the proposed method was validated as a decision making tool by the panel of experts. The expectation that the environmental effects related to operation energy consumption of the buildings would be the most significant was confirmed through the application example, although the introduction of energy conservation measures is not always justified from an environmental perspective. On the final balance of the application example of the method, compared to new construction, the rehabilitation would be environmentally feasible in all methods of lifecycle impact analysis employed in the comparisons.

Keywords: built heritage; architectural rehabilitation; environmental impacts; life cycle analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Ilustração produzida pelo <i>National Trust for Historic Preservation</i> para a <i>Preservation Week</i> de 1980, nos Estados Unidos.	26
Figura 1.2 – Edifício Ariona (a) e Edifício Serplan (b), São Paulo. ...	30
Figura 1.3 – Projeções de emissões globais de CO ₂ -eq.	33
Figura 1.4 – Emissões globais de CO ₂ relacionadas à energia comprometidas pela infraestrutura já instalada em 2010 e margem de trabalho para atingir o Cenário 450ppm.	34
Figura 2.1 – Adaptações inadequadas em edifícios históricos: aparelhos de ar-condicionado instalados sobre os brise-soleil de edifício modernista em Florianópolis, SC, Brasil.	44
Figura 2.2 – Ciclo de vida típico de edificações.	48
Figura 2.3 – Cargas e impactos ambientais relacionados com o ciclo de vida de edificações.	49
Figura 2.4 – Estrutura de uma análise de ciclo de vida.	56
Figura 2.5 – Ciclo de vida prolongado de uma edificação, quando considerada a possibilidade de sua reabilitação.	57
Figura 2.6 – Motivação da demolição de 227 edifícios comerciais e residenciais em St. Paul, Minnesota, EUA, por unidade.	62
Figura 2.7 – Exemplo de fronteira do sistema para análise de ciclo de vida de edificações.	65
Figura 2.8 – Conjunto <i>Lockefield Garden</i> , Indiana, EUA.	68
Figura 2.9 – Edifício <i>Grand Central Arcade</i> , em Seattle, EUA.	69
Figura 2.10 – Emissões acumuladas de CO ₂ ao longo de 50 anos em residências na Inglaterra.	72
Figura 2.11 – Emissões totais de CO ₂ ao final de 50 anos em residências na Inglaterra.	73
Figura 2.12 – Impactos ambientais potenciais, em %, para o conjunto residencial Morgenstond, Holanda.	80
Figura 2.13 – Impactos ambientais potenciais, em %, para o conjunto residencial Poptahof, Holanda.	81
Figura 3.1 – Cenários avaliados na análise de ciclo de vida proposta.	99
Figura 3.2 – Etapas do ciclo de vida consideradas de acordo com o conceito do impacto ambiental evitado.	100
Figura 3.3 – Efeitos ambientais analisados no cenário com nova construção (cima) e no cenário com reabilitação.	102

Figura 3.4 – Síntese da sequência de procedimentos proposta no modelo conceitual do método de avaliação da viabilidade ambiental da reabilitação.....	103
Figura 3.5 – Matriz de comparação e fronteiras do sistema da análise de ciclo de vida.	113
Figura 5.1 – Fachadas noroeste e sudoeste do Edifício das Diretorias.	145
Figura 5.2 – Área de escritórios do Edifício das Diretorias.....	146
Figura 5.3 – Planta baixa do pavimento tipo e térreo do Edifício das Diretorias.....	147
Figura 5.4 – Perspectiva axonométrica do Edifício das Diretorias.	148
Figura 5.5 – Detalhe das paredes externas do Edifício das Diretorias.	149
Figura 5.6 – Representação esquemática das zonas térmicas dos modelos simulados.....	165
Figura 5.7 – Modelo geométrico da simulação termoeenergética do edifício existente.....	166
Figura 5.8 – Brise da fachada NE adicionado ao modelo da simulação do caso reabilitação com eficiência energética.	168
Figura 5.9 – Aletas adicionadas à proteção solar da fachada NO no modelo da simulação do caso reabilitação com eficiência energética.	168
Figura 5.10 – Modelo geométrico da simulação termoeenergética do caso nova edificação teórica.....	170
Figura 5.11 – Comparativo do consumo anual de energia dos casos simulados.....	171
Figura 5.12 – Demanda energética acumulada, por fase de ciclo de vida, para 1 vida de serviço de 60 anos dos casos comparados.....	175
Figura 5.13 – Fluxos de conteúdo energético na vida de serviço do Caso base.	176
Figura 5.14 – Demanda energética acumulada em 1 vida de serviço de 60 anos, normalizada em relação ao cenário com nova construção.....	178
Figura 5.15 – Pegada ecológica, por fase de ciclo de vida, para 1 vida de serviço de 60 anos dos casos comparados.....	179
Figura 5.16 – Pegada ecológica para 1 vida de serviço de 60 anos dos casos comparados, normalizada em relação ao cenário com nova construção.....	180

Figura 5.17 – Impactos ambientais totais pelo método <i>ReCiPe midpoint</i> para 1 vida de serviço de 60 anos do caso base e do caso 18, normalizados em relação ao cenário com nova construção.....	184
Figura 5.18 – Impactos ambientais pelo método <i>ReCiPe midpoint</i> para a manutenção ao longo de 1 vida de serviço de 60 anos do caso base, por parcela de contribuição de cada componente construtivo.	186
Figura 5.19 – Danos ambientais totais pelo método <i>ReCiPe endpoint</i> , normalizados em relação ao cenário com nova construção.....	190
Figura 5.20 – Resultados das variações nos quantitativos de material para a obra inicial pelo método Demanda energética acumulada.....	192
Figura 5.21 – Resultados das variações nos quantitativos de material para a obra inicial pelo método Pegada ecológica.	193
Figura 5.22 – Resultados das variações nos quantitativos de material para a obra inicial pelo método <i>ReCiPe</i>	194
Figura 5.23 – Resultados das variações nos quantitativos de material para a manutenção das edificações pelo método Demanda energética acumulada.....	195
Figura 5.24 – Resultados das variações nos quantitativos de material para a manutenção das edificações pelo método Pegada ecológica.	196
Figura 5.25 – Resultados das variações nos quantitativos de material para a manutenção das edificações pelo método <i>ReCiPe</i>	197
Figura 5.26 – Resultados das variações no consumo anual de energia pelas edificações de acordo com o método da Demanda energética acumulada.....	198
Figura 5.27 – Resultados das variações no consumo anual de energia pelas edificações de acordo com o método da Pegada ecológica..	199
Figura 5.28 – Resultados das variações no consumo anual de energia pelas edificações de acordo com o método <i>ReCiPe</i>	200
Figura 5.29 – Resultados das variações da vida de serviço das edificações pelo método da Demanda energética acumulada.....	201
Figura 5.30 – Resultados das variações da vida de serviço das edificações pelo método da Pegada ecológica.	202
Figura 5.31 – Resultados das variações da vida de serviço das edificações pelo método <i>ReCiPe</i>	203
Figura B.1 - Relações entre os parâmetros do inventário de ciclo de vida, os indicadores <i>midpoint</i> e os indicadores <i>endpoint</i> no <i>ReCiPe</i>	289

Figura B.2 – Exemplo da modelagem no *ReCiPe* dos efeitos dos gases do efeito estufa e de seu impacto nas mudanças climáticas.....290

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Entradas de matéria e energia para a produção de 1t de vidro plano.....	52
Tabela 2.2 – Emissões atmosféricas para a produção de 1t de vidro plano.....	52
Tabela 2.3 – Consumo de energia primária e potencial de aquecimento global evitado pela reabilitação de quatro edificações no Canadá.....	75
Tabela 2.4 – Anos de equivalência de carbono para reutilização de edifícios existentes vs nova construção.....	83
Tabela 3.1 – Categorias de impacto avaliadas pelo método <i>ReCiPe</i> ao nível <i>midpoint</i>	123
Tabela 3.2 – Categorias de impacto avaliadas pelo método <i>ReCiPe</i> ao nível <i>endpoint</i>	124
Tabela 3.3 – Sequência de procedimentos para elaboração do inventário e modelagem no <i>SimaPro</i> de cada uma das etapas do ciclo de vida das edificações comparadas.....	128
Tabela 3.4 – Quesitos do modelo conceitual avaliados pelo painel de especialistas e questões correspondentes no questionário proposto aos especialistas.....	130
Tabela 3.5 – Composição do painel de especialistas.....	130
Tabela 5.1 – Áreas e usos do Edifício das Diretorias.....	146
Tabela 5.2 – Parâmetros geométricos do envoltório do edifício existente.....	150
Tabela 5.3 – Características construtivas do edifício existente.....	151
Tabela 5.4 – Serviços considerados no restauro do edifício existente e percentual de intervenção.....	153
Tabela 5.5 – Medidas de conservação de energia a serem simuladas no caso reabilitação com eficiência energética.....	154
Tabela 5.6 – Propriedades ópticas dos vidros.....	155
Tabela 5.7 – Características construtivas da nova edificação teórica.....	157
Tabela 5.8 – Serviços e percentual de intervenção nas obras de manutenção considerados na nova edificação teórica.....	158
Tabela 5.9 – Cargas internas empregadas nas simulações no <i>EnergyPlus</i>	160
Tabela 5.10 – Vida útil de projeto dos sistemas.....	161
Tabela 5.11 – Estágios do ciclo de vida e processos considerados na análise de ciclo de vida dos cenários comparados.....	162

Tabela 5.12 – Consumo anual de energia elétrica do edifício existente.....	167
Tabela 5.13 – Consumo anual de energia elétrica dos modelos simulados no caso reabilitação com eficiência energética e respectiva redução no consumo em relação ao caso base.....	169
Tabela 5.14 – Consumo anual de energia elétrica do modelo da nova edificação teórica	171
Tabela 5.15 – Processos relativos à matriz energética utilizados no inventário de ciclo de vida	172
Tabela 5.16 – Distâncias consideradas entre a obra e fornecedor dos materiais e componentes empregados nas análises de ciclo de vida	173
Tabela 5.17 – Impactos ambientais totais e por fase do ciclo de vida pelo método <i>ReCiPe midpoint</i> para 1 vida de serviço de 60 anos do caso base, caso 18 e do cenário com nova construção.....	181
Tabela 5.18 – Danos ambientais totais e por fase do ciclo de vida pelo método <i>ReCiPe endpoint</i> para 1 vida de serviço de 60 anos do caso base, caso 18 e do cenário com nova construção.....	187
Tabela C.1 - Distâncias fábrica-canteiro consideradas nas análises de ciclo de vida do exemplo de aplicação do método.....	261
Tabela D.1 – Quantitativos, relação vida de serviço da edificação / vida útil do componente e referências das composições para o restauro e manutenção do edifício existente	265
Tabela D.2 – Composições, quantitativos e processos envolvidos no restauro e manutenção do edifício existente	268
Tabela D.3 – Quantitativos, relação vida de serviço da edificação / vida útil do componente e referências das composições das medidas de conservação de energia do edifício existente	273
Tabela D.4 – Composições, quantitativos e processos envolvidos na implantação e manutenção das medidas de conservação de energia do edifício existente	274
Tabela D.5 – Composições, quantitativos e processos envolvidos na demolição do edifício existente.....	276
Tabela D.6 – Quantitativos, relação vida de serviço da edificação / vida útil do componente e referências das composições para a construção e manutenção da nova edificação teórica.....	278
Tabela D.7 – Composições, quantitativos e processos envolvidos na construção da nova edificação teórica.....	279
Tabela D.8 – Composições, quantitativos e processos envolvidos na manutenção da nova edificação teórica	283

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	V
RESUMO.....	IX
ABSTRACT	XI
LISTA DE FIGURAS	XIII
LISTA DE TABELAS	XVII
1 INTRODUÇÃO	23
1.1 MOTIVAÇÃO, HIPÓTESES E PRESSUPOSTOS DA PESQUISA.....	29
1.2 JUSTIFICATIVAS	31
1.3 OBJETIVOS	36
1.3.1 <i>Objetivo Geral</i>	36
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i>	36
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	37
2 REVISÃO DA LITERATURA	39
2.1 MEIO AMBIENTE, DESENVOLVIMENTO E PRESERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO EDIFICADO	39
2.1.1 <i>A reabilitação de edificações de interesse para preservação.</i>	42
2.1.2 <i>Oportunidades e desafios na reabilitação de edificações</i>	44
2.2 O PENSAMENTO EM CICLO DE VIDA E A REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS EXISTENTES	47
2.2.1 <i>A técnica de análise de ciclo de vida</i>	51
2.2.2 <i>A análise de ciclo de vida na avaliação do desempenho ambiental de edificações</i>	56
2.2.3 <i>Problemática da análise de ciclo de vida na reabilitação de edificações</i>	60
2.3 ESTUDOS SOBRE A VIABILIDADE AMBIENTAL DA REABILITAÇÃO	66
2.3.1 <i>Primórdios: energia incorporada e energia de operação</i>	66
2.3.2 <i>Emissões de CO₂ relacionadas à energia</i>	70
2.3.3 <i>O estado-da-arte: análise de ciclo de vida ambiental</i>	78
2.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL NA REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS HISTÓRICOS .	85
2.4.1 <i>Ferramentas de simulação computacional de edificações e aplicações</i>	86
2.4.2 <i>Construção do modelo para simulação computacional de edificações</i>	88

2.4.3	<i>Avaliação de alternativas de reabilitação usando simulação computacional de edificações.....</i>	89
2.5	PAINEL DE ESPECIALISTAS	90
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A REVISÃO DA LITERATURA	94
3	MATERIAIS E MÉTODO.....	97
3.1	ELABORAÇÃO DO MODELO CONCEITUAL DO MÉTODO DE AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE AMBIENTAL DA REABILITAÇÃO DE EDIFICAÇÕES	104
3.1.1	<i>Modelagem dos cenários para a comparação.....</i>	<i>104</i>
3.1.1.1	Cenário com reabilitação: definição do caso base – restauro do edifício existente.....	104
3.1.1.2	Cenário com reabilitação: definição do caso reabilitação com eficiência energética	105
3.1.1.3	Cenário com nova construção: definição da edificação de referência para a comparação – a nova edificação teórica	106
3.1.2	<i>Modelagem do escopo da análise de ciclo de vida.....</i>	<i>109</i>
3.1.2.1	Identificação da função na comparação.....	109
3.1.2.2	Determinação das características de desempenho.....	109
3.1.2.3	Definição da unidade funcional.....	110
3.1.2.4	Delimitação da fronteira do sistema	112
3.1.2.5	Omissões de estágios do ciclo de vida, processos ou necessidades de dados	114
3.1.2.6	Critérios de corte para a inclusão inicial de entradas e saídas	115
3.1.3	<i>Modelagem do inventário de ciclo de vida.....</i>	<i>115</i>
3.1.3.1	Estimativa do consumo de energia para operação	116
3.1.3.2	Estimativa das composições e quantitativos de materiais	118
3.1.3.3	Análise de sensibilidade para refinamento da fronteira do sistema	119
3.1.3.4	Princípios e procedimentos de alocação	120
3.1.4	<i>Seleção do(s) método(s) de avaliação de impacto de ciclo de vida</i>	<i>121</i>
3.1.5	<i>Tratamento dos dados</i>	<i>124</i>
3.2	AVALIAÇÃO PELO PAINEL DE ESPECIALISTAS	128
3.3	SELEÇÃO DA EDIFICAÇÃO PARA O EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO MÉTODO	131
4	AVALIAÇÃO DO MODELO CONCEITUAL POR PAINEL DE ESPECIALISTAS	133
4.1	MODELAGEM DOS CENÁRIOS PARA A COMPARAÇÃO	133
4.1.1	<i>Determinação da matriz de comparação.....</i>	<i>133</i>
4.1.2	<i>Definição do cenário com reabilitação.....</i>	<i>134</i>
4.1.3	<i>Definição do cenário com nova construção.....</i>	<i>134</i>

4.2	MODELAGEM DO ESCOPO DA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA	136
4.2.1	<i>Determinação das características de desempenho e definição da unidade funcional</i>	136
4.2.2	<i>Delimitação da fronteira do sistema, inclusive omissões de processos e estágios do ciclo de vida</i>	137
4.3	MODELAGEM DO INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA	139
4.3.1	<i>Estimativa das composições e quantitativos de materiais</i> ...	139
4.3.2	<i>Estimativa do consumo de energia para operação</i>	140
4.4	MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA	140
4.4.1	<i>Adequação dos indicadores utilizados aos objetivos do trabalho</i>	140
4.4.2	<i>Compreensão dos indicadores utilizados</i>	142
4.5	SÍNTESE DO PAINEL DE ESPECIALISTAS	142

5 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO MÉTODO DE AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE AMBIENTAL DA REABILITAÇÃO 145

5.1	CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO EXISTENTE	146
5.2	CENÁRIOS PARA COMPARAÇÃO	152
5.2.1	<i>Caso base – restauro do edifício existente</i>	152
5.2.2	<i>Caso reabilitação com eficiência energética</i>	153
5.2.3	<i>Caso nova edificação teórica</i>	156
5.3	OBJETIVO E ESCOPO DA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA	158
5.3.1	<i>Função</i>	158
5.3.2	<i>Características de desempenho</i>	159
5.3.3	<i>Unidade funcional</i>	161
5.3.4	<i>Fronteiras do sistema</i>	161
5.3.4.1	Estágios do ciclo de vida das edificações	161
5.3.4.2	Destinação de resíduos de demolição	163
5.3.4.3	Sistemas, componentes e elementos construtivos considerados	164
5.4	INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA	165
5.4.1	<i>Consumo de energia para operação</i>	165
5.4.1.1	Caso base – restauro do edifício existente	166
1.1.1.1	Caso reabilitação com eficiência energética	167
5.4.1.2	Caso nova edificação teórica	170
5.4.2	<i>Composições e Materiais</i>	172
5.5	AVALIAÇÃO DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA	174
5.5.1	<i>Demanda energética acumulada</i>	174
5.5.2	<i>Pegada Ecológica</i>	179
5.5.3	<i>ReCiPe</i>	180
5.6	ANÁLISES DE SENSIBILIDADE	191

5.6.1	<i>Variação nos quantitativos de materiais da obra inicial (construção e demolição).....</i>	<i>191</i>
5.6.2	<i>Variação nos quantitativos de materiais para manutenção (construção e demolição).....</i>	<i>195</i>
5.6.3	<i>Variação no consumo de energia para operação.....</i>	<i>198</i>
5.6.4	<i>Variação no período da vida de serviço.....</i>	<i>201</i>
5.7	SÍNTESE DOS RESULTADOS DO EXEMPLO DE APLICAÇÃO	203
6	CONCLUSÕES	205
6.1	LIMITAÇÕES DO TRABALHO	209
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	210
	REFERÊNCIAS	211
	APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO DE CONSULTA AO PAINEL DE ESPECIALISTAS	233
	APÊNDICE B – QUALIFICAÇÃO DOS MEMBROS DO PAINEL DE ESPECIALISTAS	257
C.	APÊNDICE C – DISTÂNCIAS FÁBRICA-CANTEIRO CONSIDERADAS NO EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO MÉTODO	261
D.	APÊNDICE D – LEVANTAMENTO DE COMPOSIÇÕES E MATERIAIS PARA O INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA	265
D.I	CASO BASE – RESTAURO DO EDIFÍCIO EXISTENTE.....	265
D.II	CASO REABILITAÇÃO COM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	272
D.III	CASO NOVA EDIFICAÇÃO TEÓRICA.....	275
	ANEXO A – FICHA CADASTRAL DO EDIFÍCIO DAS DIRETORIAS NO IPHAN-SC.....	287
B.	ANEXO B – MODELAGEM DA AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DE CICLO DE VIDA PELO MÉTODO <i>RECIPE</i>	289

1 INTRODUÇÃO

A construção de edificações é uma atividade responsável por inúmeros prejuízos ao meio ambiente, e é consenso que a condição do parque edilício atual não contribui para a mitigação dos efeitos do aquecimento global e de suas repercussões ambientais. Em face disso, o desenvolvimento de políticas públicas voltadas a uma maior sustentabilidade do ambiente construído é urgente e imprescindível. Nesse contexto, a requalificação do parque edilício, por meio da reabilitação dos edifícios existentes, surge como alternativa na redução dos impactos ambientais provocados pelo setor. Em contraponto às potencialmente poluidoras atividades de demolição e construção de novas edificações, a reabilitação apresenta vantagens ambientais, sociais e econômicas (LAEFER; MANKE, 2008; LOWE, 2007; MANSFIELD, 2009).

A reabilitação arquitetônica envolve a readequação de edifícios existentes de maneira a atender a normas de desempenho e padrões de conforto e utilização mais atuais. É uma oportunidade ímpar de alçar essas edificações a níveis superiores de desempenho ambiental, reduzindo, sobretudo, o consumo de energia. Na hipótese de ser efetivada em uma parcela significativa do estoque edificado, a reabilitação visando melhorias de desempenho nas edificações pode surtir efeitos com mais rapidez nos esforços e políticas de redução dos problemas ambientais (MANSFIELD, 2009). Se justaposta a políticas de preservação de edifícios dotados de significado histórico ou cultural, a reabilitação arquitetônica ainda retém e promove um importante capital social: a memória construída (MANSFIELD, 2009; POWER, 2008, 2010). A reabilitação é uma abordagem bastante apropriada para a requalificação e prolongamento da vida útil das arquiteturas do passado recente, como aquelas do Movimento Moderno, cuja concepção espacial é bastante propícia a readequações de uso. Em diversos países, esses edifícios representam, no parque edilício, a parcela com os níveis mais precários de eficiência energética (ELEFANTE, 2007; FEILDEN, 2003; FREY; ANDERSON; ANDREWS; WOLF, 2008). A possibilidade de incorporar o valor ambiental traz novas alternativas à preservação desse patrimônio, ameaçado e privado, pelo senso comum, de historicidade e legitimação (TEIXEIRA; GRAD, 2011).

Acrescenta-se, assim, o já consolidado argumento da conservação ambiental ao discurso da preservação do patrimônio edificado.

Entretanto, a inserção da preservação do patrimônio edificado dentre as práticas consideradas ambientalmente apropriadas – e o desenvolvimento de políticas públicas para tal – não pode prescindir da definição de indicadores de desempenho social, econômico e ambiental (FREY; ANDERSON; ANDREWS; WOLF, 2008; POWTER; ROSS, 2005; STOVEL, 2011). Os primeiros são de difícil, talvez impossível, mensuração; os indicadores econômicos já são bastante explorados nas análises sobre o valor monetário do patrimônio cultural (MASON, 2005); o aspecto ambiental, embora cada vez mais estudado, ainda apresenta um vasto território a ser explorado.

Ocorre que as próprias atividades de conservação, restauração e reabilitação de edifícios encerram uma carga ambiental em si (KAVENAGH, 1996; LYONS; REYNOLDS, 1996). Intervenções em edifícios existentes que visem melhorar o seu desempenho ambiental também têm consequências ambientais. No caso da implantação de medidas de eficiência energética em uma edificação, por exemplo, deve-se garantir que os benefícios gerados pela economia de energia não sejam menores que os danos envolvidos na intervenção – e eles existem (ROLFSMAN, 2002). Se tomado o valor de uso como aquele que justifica a preservação da edificação e norteia sua reabilitação, há que se evitar que a edificação histórica, reabilitada, atinja níveis de desempenho aquém daqueles apresentados por edificações novas. Nesta situação, além de a edificação responder por uma elevada carga ambiental durante sua vida útil, também acarretaria em maiores despesas para sua operação. Em um viés reducionista, a reabilitação somente se justificaria se essa carga não fosse maior do que os impactos somados da demolição do edifício existente, da construção e da operação de uma nova edificação durante um mesmo tempo de vida útil.

Entre os defensores da preservação do patrimônio edificado, a primeira tentativa de se estabelecer parâmetros quantitativos acerca da viabilidade ambiental da reabilitação de edifícios ocorreu no final da década de 1970. Naquela época, os preservacionistas

adotaram os estudos sobre energia incorporada nas edificações com uma interpretação bastante particular. Denomina-se energia incorporada (do inglês *embodied energy*, por vezes traduzido como energia embutida) em edificações à soma de todos os insumos energéticos despendidos na produção dos materiais e componentes para a sua construção, desde a extração da matéria-prima até a finalização da obra. A energia incorporada pode representar uma parcela significativa de toda energia consumida em uma edificação ao longo de seu ciclo de vida (fabricação dos materiais, transporte, construção, uso e demolição). Defendia-se que demolir uma edificação significaria desperdiçar toda essa energia, visto que não haveria como reaproveitá-la ou convertê-la para outras aplicações. Fazia-se, inclusive, analogia direta entre a energia incorporada nos edifícios e uma quantidade equivalente de combustível fóssil (Figura 1.1). O principal indicador para justificar a viabilidade ambiental da reabilitação era, então, a quantidade de energia que o edifício existente trazia incorporada. Esta energia seria desprezada ou conservada em função da decisão de reabilitar ou não a edificação (ACHP, 1979).


Embora alguns estudos ainda demonstrem preocupação com essa carga ambiental originada no passado (BIN, 2011), outras abordagens tratam da energia e recursos incorporados nos edifícios existentes como um custo “afundado” ou perdido (em analogia ao termo em inglês *sunk cost* utilizado nas ciências econômicas) (ERLANDSSON; BORG, 2003). Afinal, foram consumidos no passado e os impactos associados – sejam eles ambientais, sociais ou econômicos – ocorreram anos, décadas atrás. Por outro lado, os insumos que serão utilizados agora ou nas próximas décadas ou séculos são aqueles que devem ser poupados e que, de fato, repercutem no meio ambiente. Nessa lógica, a reutilização de um edifício existente conservaria os recursos que seriam utilizados para construir uma nova edificação em seu lugar (MENZIES, 2011; NTHP, 2012). As melhorias em eficiência energética de edifícios existentes constituem, então, um ponto chave da reabilitação, pois reduziriam a demanda futura de energia da edificação (ERLANDSSON; BORG, 2003). Surge daí o conceito do impacto evitado como indicador da viabilidade ambiental da reabilitação de edifícios. Esse enfoque compara as repercussões ambientais envolvidas na reabilitação e

uso de um edifício existente àquelas relacionadas à sua demolição, construção e uso de uma nova edificação de função equivalente.

P R E S E R V A T I O N:

Reusing America's Energy

Preservation Week May 11-17, 1980



**It takes energy to construct a new building.
It saves energy to preserve an old one.**

It takes the energy equivalent of one gallon of gasoline to make, deliver and install eight bricks. Preserving eight old bricks instead of throwing them away and making new ones means that the energy of a gallon of gasoline can be used to meet other needs. Reusing old buildings saves the energy required to demolish and replace them with new buildings. And properly rehabilitated old buildings use no

more energy, on the average, than brand new buildings for operation. Save energy—save a building! Join the National Trust for Historic Preservation and the U.S. Department of Energy in observing Preservation Week 1980. For details, write to Preservation Week, National Trust, c/o Massachusetts Ave., N.W., Washington, D.C. 20036. Or contact your local preservation organization.

NATIONAL TRUST FOR HISTORIC PRESERVATION

© 1980 by National Trust for Historic Preservation

Figura 1.1 – Ilustração produzida pelo *National Trust for Historic Preservation* para a *Preservation Week* de 1980, nos Estados Unidos.

Fonte: (BOSCO-MILLIGAN FOUNDATION, 2008).

Tendo como perspectiva a construção de indicadores baseados no conceito de impacto evitado, os estudos de excelência se apoiam em técnicas de análise de ciclo de vida (ACV). A análise de ciclo de vida é um método de quantificação e avaliação do desempenho ambiental de produtos e serviços. Aplicado às edificações, pode contabilizar outras cargas ambientais – que não somente o uso de energia – associadas à sua construção, utilização e demolição, tais como: o consumo de água e de matérias primas; uso e contaminação do solo, emissões atmosféricas e despejo de fluídos tóxicos. Baseada ou não em técnicas de análise de ciclo de vida, a proposição de métodos e procedimentos para avaliar as consequências ambientais da reabilitação de edifícios existentes têm marcado pauta na comunidade científica internacional. Ainda resta, todavia, uma série de questões a serem exploradas. Como calcular o verdadeiro custo da reabilitação vs. o custo real de substituir um edifício histórico? E os custos da energia incorporada em materiais existentes; o custo da demolição; transporte e disposição de resíduos; e a produção, transporte e instalação de novos materiais?

Desde os primeiros estudos sobre energia incorporada, alguns trabalhos se dirigiram ao assunto, ainda que nem todos tenham se focado apenas no patrimônio edificado. Trusty (2004), no Canadá, comparou o potencial de aquecimento global e o potencial de acidificação envolvidos na reabilitação de edifícios existentes e na construção de área útil equivalente. Na Inglaterra, a *Empty Homes Agency* confrontou as emissões de CO₂ relacionadas à reutilização de edifícios e à construção de novas moradias (EHA, 2008). Um estudo realizado para o *Parks Canada* estimou o dispêndio de energia e as emissões de CO₂ que seriam evitados pela reabilitação de edifícios históricos em vez de sua substituição (ATHENA SUSTAINABLE MATERIALS INSTITUTE; MORRISON HERSHFIELD LIMITED, 2009; LUCIUK; TRUSTY; HUFFMAN; PREFASI, 2010). Voltando à Europa, Sturgis e Roberts (2010) desenvolveram um método para delinear o perfil das emissões de carbono pelas edificações ao longo do seu ciclo de vida, considerando o CO₂ vinculado às estruturas que foram parcial ou totalmente demolidas, respectivamente, no caso de reabilitações ou de substituição de edifícios existentes. Itard e Klunder (2007) demonstraram, através de análise de ciclo de vida, que a reabilitação provoca menos perturbações ao meio ambiente que a construção de novas

edificações: os autores compararam essas duas situações, avaliando diversas categorias de impactos ambientais, como potencial de aquecimento global, de formação de foto-oxidantes, de acidificação etc. O *National Trust for Historic Preservation* chegou a conclusões parecidas em *The Greenest Building: Quantifying the environmental value of building reuse* (NTHP, 2012). O *National Trust* evidenciou que, de forma geral, a reabilitação de diversos tipos de edificações dos Estados Unidos, ao ser comparada com a construção de novos edifícios, repercutiu menos sobre as categorias de danos ambientais relacionadas às mudanças climáticas, à saúde humana, à qualidade dos ecossistemas e depleção de recursos naturais.

Os trabalhos citados compartilham uma grande preocupação com os efeitos relacionados à extração de matéria prima, fabricação e transporte de materiais, construção e demolição das edificações. As consequências ambientais decorrentes da operação das edificações ao longo de sua vida útil – dos quais o consumo de energia é a mais importante (SARTORI; HESTNES, 2007) – não foram negligenciadas. Porém, o consumo de energia para operação dos edifícios foi avaliado a partir de procedimentos não muito acurados. O nível de eficiência energética dos edifícios reabilitados foi admitido como comparável ao de novas construções e tomado a partir de médias estatísticas de consumo de energia – em um dos métodos propostos em ACHP (1979) e, também, em NTHP (2012); ou avaliado por meio de cálculos prescritivos e modelagens simplificadas – como em ACHP (1979), Itard e Klunder (2007), EHA (2008), Athena Institute e Morrison Hershfield Limited (2009) e Lucuik *et al.* (2010). Existem diversos métodos válidos para estimar o consumo de energia e avaliar o desempenho termoenergético de edificações (ZHAO; MAGOULÈS, 2012). Mas, tendo em vista as particularidades construtivas dos edifícios mais antigos, a simulação computacional dinâmica apresenta-se como o mais adequado. Iyer-Raniga e Wong (2012) apresentaram uma interessante contribuição metodológica nesse sentido, em trabalho onde compararam o desempenho ambiental de sete residências de interesse para preservação com uma de construção recente, na Austrália. Os autores utilizaram ferramenta de simulação termoenergética para estimar o consumo de energia das edificações.

O uso concomitante da simulação termoeenergética e de técnicas de análise de ciclo de vida constitui um instrumento ímpar na avaliação do desempenho ambiental de edificações e na tomada de decisão em projetos de reabilitação. Utilizando essas duas abordagens – de análise de ciclo de vida e de simulação termoeenergética –, pretende-se desenvolver um método para avaliar a viabilidade ambiental da reabilitação de edificações históricas, especialmente aquelas do Movimento Moderno. No contexto desta pesquisa, entende-se por “avaliação da viabilidade” uma análise que procura antecipar a pertinência ambiental da reabilitação de um edifício existente, estimando seus eventuais benefícios, em termos de impacto ambiental evitado, tendo como referencial a hipótese da sua demolição e a construção de uma nova edificação.

1.1 MOTIVAÇÃO, HIPÓTESES E PRESSUPOSTOS DA PESQUISA

Cabe ilustrar com um exemplo as inquietações que motivaram a escolha do tema: o caso da substituição de um edifício representativo da arquitetura modernista em São Paulo. Projeto de 1953 de Marjan Ryszard Glogowski e Lucjan Korngold, o Ariona (Figura 1.2a), edifício na Av. Paulista de 6.993 m², com 14 pavimentos mais subsolo e ático (FALBEL, 2003), foi demolido em 2002. Cedeu “lugar ao progresso” (“Estadão,” 2001): uma edificação com 900 m² a menos e de arquitetura passadista (Figura 1.2b), portanto, de coerência estética questionável. Segundo o arquiteto Abílio Guerra, editor do principal portal de divulgação e crítica arquitetônica no Brasil, “a substituição de um edifício – normal nas grandes cidades e normalíssimo em São Paulo – pode incorrer em anacronismos, onde o edifício mais recente é mais ‘velho’ do que o antigo” (informação privativa)¹. Essa, em específico, sequer faz sentido no que diz respeito à melhoria de requisitos de desempenho termoeenergético. O novo prédio apresenta amplas áreas envidraçadas, inexistentes no edifício anterior, abertas justamente na elevação sobre qual a incidência solar seria mais indesejada. Afora as considerações sobre a estética dos edifícios, quais foram (ou estão sendo) as repercussões ambientais dessa substituição? E com base em quais indicadores?

¹ Texto postado por Guerra em fórum de discussão na internet em 19 de Junho de 2011.

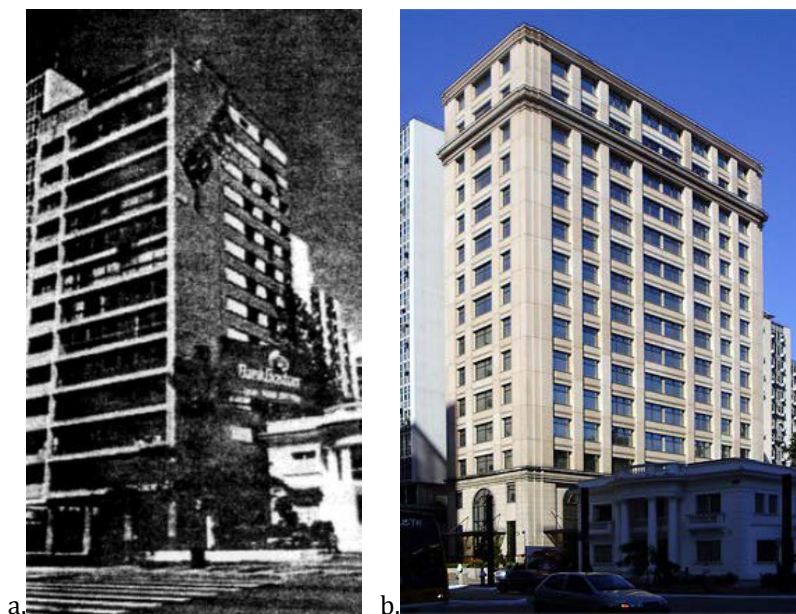


Figura 1.2 – Edifício Ariona (a) e Edifício Serplan (b), São Paulo.

Fonte: a. Hiroyama (2010); b. Fotografia de Abílio Guerra.

O propósito deste estudo é contribuir com essa discussão, inserindo-a na realidade brasileira. A temática merece consideração na medida em que, no Brasil, entram em vigor e dissemina-se a aplicação de regulamentos de eficiência energética. Aqui, a obtenção da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) para edificações ainda é de caráter voluntário. Todavia, o Plano Nacional de Eficiência Energética (PNE) estabeleceu, como linha de ação, um prazo máximo de 10 anos para a obrigatoriedade da etiquetagem de edificações do poder público (MME, 2011), seguido dos demais setores. No sistema brasileiro de etiquetagem de edifícios, os Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) aplicam-se a quaisquer edificações, existentes ou em projeto, com “área total útil mínima de 500 m² e/ou com tensão de abastecimento superior ou igual a 2,3 kV” (MDIC/INMETRO, 2010). Considerando essa condição, em um futuro não muito distante, boa parte dos edifícios existentes submetidos a obras de reforma

deverão ser etiquetados. As edificações históricas, portanto, não deverão fugir à regra.

A hipótese posta é que, considerando o conceito do impacto ambiental evitado, a reabilitação de uma edificação causa menos danos que a sua demolição acrescida da construção de uma nova edificação, ainda que esta seja mais eficiente. Parte-se do pressuposto que, utilizando-se de ferramentas de análise de ciclo de vida e de simulação termoeenergética de edificações, é possível estimar, com boa dose de confiabilidade, o impacto ambiental evitado com a reabilitação. Combinadas a instrumentos já conhecidos dos projetistas para a quantificação de materiais e determinação de níveis de eficiência – como as Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos (TCPO), os regulamentos de eficiência energética e normas desempenho –, aquelas ferramentas podem instrumentalizar um método útil de apoio à decisão na avaliação da viabilidade ambiental da reabilitação.

Não faz parte do escopo deste trabalho teorizar sobre a ciência da preservação, mas tais princípios não serão descuidados, sendo abordados enquanto processo, e não como indicador final. Embora o campo disciplinar da preservação se fundamente, em grande monta, sobre critérios subjetivos, os princípios de intervenção no patrimônio cultural podem, sim, ser ponderados sob um viés teórico-metodológico (KÜHL, 2008).

1.2 JUSTIFICATIVAS

A redução do consumo de energia tem fundamental importância na satisfação de critérios de desempenho ambiental pelas edificações. Na União Europeia, as edificações residenciais, comerciais e institucionais são responsáveis por 38,7% do uso final de energia (SPYROPOULOS; BALARAS, 2011); nos Estados Unidos, 42% (U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2011); no Brasil, 44% do total de energia elétrica consumida no país (EPE, 2012). Grande parte da energia utilizada pelas edificações provém de fontes não renováveis e, por conseguinte, potencialmente poluidoras. Do total mundial de emissões na atmosfera de gases causadores do efeito estufa e da depleção da camada de ozônio, 26% devem-se à produção e uso de recursos energéticos. Aproximadamente 8,6 Gt

de CO₂ (o principal dos gases causadores do efeito estufa) são lançados anualmente na atmosfera pelo uso de energia nas edificações – computando as emissões diretas e aquelas relacionadas ao consumo de eletricidade –, perfazendo 33% do total global de emissões (IPCC, 2007).

Desde as duas grandes crises do petróleo nos anos 1970, investimentos diversos para a melhoria do desempenho energético das edificações têm sido implantados em vários países (MENDES; WESTPHAL; LAMBERTS; CUNHA NETO, 2008; YOUNG, 2011). Estados que utilizavam prioritariamente combustíveis fósseis para a geração de energia elétrica concentraram esforços na redução dessa dependência. Recursos foram direcionados para o financiamento de construções novas e eficientes e para a reforma de edificações existentes visando à eficiência energética. Criaram-se normas e regulamentos de eficiência energética em edificações. Por conta das metas de redução nas emissões de gases do efeito estufa estabelecidas pelo Protocolo de Kyoto (ONU, 1998), em anos recentes essas políticas se intensificaram e foram iniciadas também em outras nações. A despeito desses esforços, se não forem tomadas medidas contundentes para reduzir o consumo de energia pelas edificações, espera-se um crescimento considerável nas emissões de CO₂ pelo parque edilício nos próximos anos.

Em uma projeção onde seriam adotadas medidas intensivas para limitar os efeitos das mudanças climáticas, a concentração de todos os gases causadores do efeito estufa na atmosfera ficaria estabilizada em 450 partes por milhão em 2035 – níveis comparáveis ao do período pré-industrial. Esse quadro, chamado de Cenário 450, prevê a emissão de no máximo 21,6 GtCO₂ naquele ano (Figura 1.3), das quais as edificações respondem por cerca de 10%. Ainda assim, isso incorreria no aumento da temperatura global em 2°C. Um aumento de 3,5°C já deverá elevar o nível dos mares em 2 metros, alterando padrões de precipitação e incorrendo em ondas de calor, com consequências graves aos assentamentos urbanos, à produção de alimentos e à saúde humana (IEA, 2011).

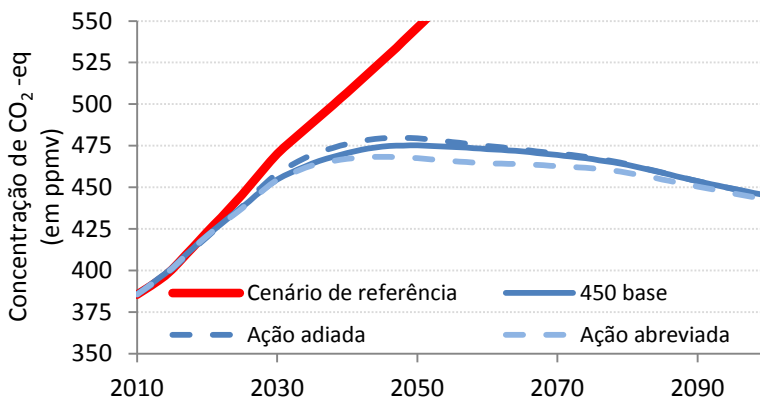


Figura 1.3 – Projeções de emissões globais de CO₂-eq.

Fonte: Adaptado de OECD (2012).

Uma das barreiras para se atingir essas metas é o fato de que a maior parte das emissões de CO₂ já está comprometida com a infraestrutura atualmente instalada ou em construção (DAVIS; CALDEIRA; MATTHEWS, 2010). Em 2017, as centrais elétricas, as fábricas, os equipamentos de transporte e os edifícios já existentes responderão pela totalidade das emissões de CO₂ admissíveis no Cenário 450 (IEA, 2011). No Reino Unido, por exemplo, cuja taxa de renovação do estoque edificado é da ordem de 1%, 75% das edificações já construídas ainda estarão de pé em 2050, respondendo por 27% de todas as emissões de carbono (POWER, 2008, 2010; RAVETZ, 2008; SDC, 2006). Esse baixo índice de renovação do parque edilício é recorrente em outros países industrializados como a Alemanha (PETERSDORFF; BOERMANS; HARNISCH, 2006) ou os Estados Unidos (ELEFANTE, 2007). Resta, no Cenário 450, uma restrita margem de trabalho para as novas estruturas (Figura 1.4) que, nessa perspectiva, teriam que ser construídas e operacionalizadas sem nenhuma emissão, algo economicamente inviável (IEA, 2011).

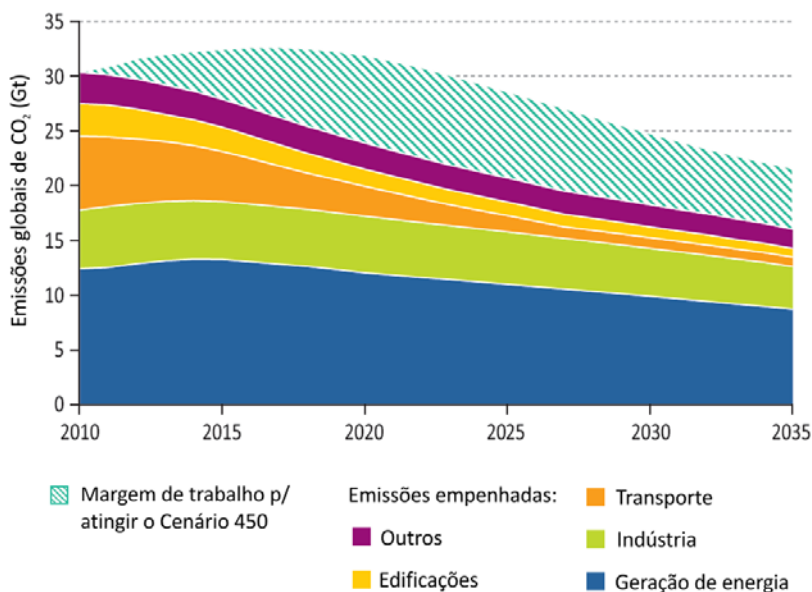


Figura 1.4 – Emissões globais de CO₂ relacionadas à energia comprometidas pela infraestrutura já instalada em 2010 e margem de trabalho para atingir o Cenário 450ppm.

Fonte: Adaptado de IEA (2011).

Decorre, então, que programas e diretrizes direcionadas apenas às novas construções não resultarão em um parque edilício mais sustentável em um curto espaço de tempo (MANSFIELD, 2009). Um dos motivos é o efeito vagaroso da substituição de edificações ineficientes por novas de alto desempenho; outro motivo são as cargas ambientais decorrentes da própria ação de construção de novas edificações. Em países desenvolvidos, a construção de edifícios responde por 50% do consumo de recursos naturais, 52% de água e ainda gera 11 milhões de toneladas de resíduos ao ano, citando aqui números do Canadá como exemplo (GORGOLEWSKI, 2005). Na Inglaterra, 24% de todo o lixo produzido é resultado das atividades de construção e demolição (HOUSE OF COMMONS, 2004). Nas nações em desenvolvimento, a realidade econômica e os padrões construtivos de menor qualidade pressupõem dígitos ainda maiores: no Brasil, estima-se que o consumo anual de agregados naturais, somente para a produção de concretos e argamassas, seja

da ordem de 210 milhões de toneladas (JOHN, 2000). Nas grandes cidades brasileiras, a geração de resíduos de construção e demolição – onde metade provém das atividades de canteiro de obras e o restante de atividades de demolição e manutenção – pode chegar a 70% da massa total de resíduos sólidos urbanos (PINTO, 1999).

Por outro lado, investimentos economicamente viáveis em eficiência energética em edifícios existentes – mediante a realização de modernizações básicas para aperfeiçoar seu desempenho energético – poderiam reduzir a demanda de energia do setor em aproximadamente 28% somente no continente europeu (EKINS; LEES, 2008). Para o Brasil, estima-se em 30% o potencial de economia de energia com melhorias no envoltório e nos sistemas de iluminação e climatização de edifícios existentes (MME, 2011). Esse saldo positivo se repete em estudos que abrangem também outras regiões do planeta (AL-GHANDOOR; JABER; AL-HINTI; MANSOUR, 2009; ERLANDSSON; LEVIN, 2005). Nesse balanço deve-se considerar ainda uma questão chave: a energia incorporada. Com a demolição de uma edificação, mais energia incorporada seria consumida na construção de um edifício novo (MANSFIELD, 2009; POWTER; ROSS, 2005; SEDOVIC; GOTTHELF, 2010). Itard e Klunder (2007) demonstraram que a energia incorporada em edificações residenciais na Holanda corresponde a aproximadamente 20% do total da energia primária utilizada pelo edifício em um ciclo de vida de 50 anos. Com base em estudos realizados na Inglaterra e Alemanha, Power (2008, 2010) assegura que, considerando um menor consumo de energia de operação em comparação a um edifício antigo, uma edificação nova tomaria cerca de 60 anos para amortizar a energia incorporada.

Ao trazer à tona as questões sobre o valor da preservação do patrimônio no contexto ambiental, os preservacionistas estavam preocupados com o risco de desaparecimento de muitos edifícios de interesse histórico e cultural. Essa discussão avançou nos Estados Unidos, Canadá, Austrália e em alguns países da Europa. No Brasil, correlacionar os benefícios ambientais da reabilitação com indicadores passíveis de serem incorporados em políticas públicas de desenvolvimento urbano e de preservação do patrimônio é uma proposta ainda inovadora. Ademais, o patrimônio edificado no

Brasil, por ser mais recente, demanda uma abordagem diferente daquela da Europa. E, por suas características construtivas, merece um tratamento diverso daquele dos países da América do Norte e Oceania. Nesses lugares, onde há tempos se têm uma cultura de normas e regulamentos de desempenho, já há uma diferença muito maior entre as novas construções e as edificações antigas em termos de tecnologia construtiva e eficiência.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver um método, baseado no conceito de análise de ciclo de vida e com foco na eficiência energética, para avaliar a viabilidade ambiental da reabilitação – comparada com demolição e nova construção – de edificações comerciais, institucionais ou públicas e de interesse para preservação, em especial aquelas do Movimento Moderno.

1.3.2 Objetivos Específicos

De forma a se atingir o objetivo geral proposto, a pesquisa se desdobrará em etapas intermediárias que visam:

1. Avaliar a aplicabilidade das Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos (TCPO) e da simulação termoenergética para o inventário de cargas ambientais incorporadas nos materiais e de operação, respectivamente, na análise do ciclo de vida de edificações;
2. Analisar o desempenho de uma edificação modernista em relação ao desempenho esperado para o nível mais alto de eficiência energética do sistema brasileiro de etiquetagem de edificações (MDIC/INMETRO, 2010);
3. Analisar as repercussões ambientais de intervenções no envoltório de uma edificação existente realizada com vistas a reduzir o consumo de energia para operação;
4. Estimar os impactos ambientais decorrentes da reabilitação de uma edificação existente em comparação com a hipótese de sua demolição e construção de uma nova edificação equivalente.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Apresentados a introdução e os objetivos da pesquisa, o presente trabalho prossegue com a revisão da literatura nacional e internacional relacionada com o tema proposto. No capítulo seguinte, é proposto o método a ser empregado na pesquisa para a elaboração de um modelo conceitual do método de avaliação da viabilidade ambiental da reabilitação de edificações existentes. São especificados os pressupostos empregados na elaboração dos cenários para a comparação entre as hipóteses de reabilitação de edifícios existentes vs. demolição e nova construção. Explicitam-se os procedimentos de levantamento de dados para a simulação termoeenergética e para o inventário de ciclo de vida, bem como os métodos empregados na análise de impacto de ciclo de vida e para a avaliação do método proposto por um painel de especialistas. No capítulo 4 são apresentadas e discutidas as proposições e definições resultantes da avaliação do método proposto pelo painel de especialistas. No quinto capítulo, é apresentado um exemplo de aplicação do método proposto para a avaliação da viabilidade ambiental da reabilitação de edificações existentes, desenvolvido a partir dos procedimentos detalhados no método e considerando os apontamentos do painel de especialistas. Os resultados da aplicação do método são discutidos nesse mesmo capítulo. No último capítulo são apresentadas as conclusões, as limitações do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, são traçadas reflexões sobre a correlação entre os impactos ambientais inerentes às edificações, o desenvolvimento sustentável e a preservação do patrimônio edificado. Em seguida, é introduzido o conceito de “pensamento de ciclo de vida”, tratando de aspectos metodológicos da análise de ciclo de vida, bem como de sua aplicação na área de edificações. Posteriormente, segue-se à contextualização histórica de estudos centrados na avaliação da viabilidade ambiental da reabilitação de edifícios existentes, com ênfase naqueles de valor cultural. No item seguinte, é abordada a utilização da análise de ciclo de vida e da simulação termoeenergética como ferramentas de apoio à decisão em projetos de reabilitação de edificações. Por fim, são levantadas algumas considerações a respeito de painel de especialistas, procedimento metodológico que foi empregado para avaliar as premissas e os juízos de valor adotados no método desta pesquisa.

2.1 MEIO AMBIENTE, DESENVOLVIMENTO E PRESERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO EDIFICADO

(...) older buildings represent an important aesthetic, cultural and economic resource, as well as (not only) a non-renewable one
(MANSFIELD, 2009).

A Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (CNUMAD), realizada em 1992 no Rio de Janeiro, foi um marco das discussões internacionais sobre os problemas ambientais. Entretanto, a pauta dos debates sobre desenvolvimento sustentável ficara mais restrita à mitigação dos danos ao meio ambiente provocados pela ocupação humana. Buscou-se soluções para problemas como acesso à moradia, abastecimento de água, fornecimento de energia e saneamento básico. A 2ª Conferência das Nações Unidas sobre Assentamentos Humanos (HABITAT II) levantou outra problemática, ao reconhecer que os edifícios e lugares dotados de significado cultural representam um importante componente da vida social. Estabeleceu que a preservação desse patrimônio, edificado, é premissa fundamental no uso sustentável

de recursos naturais e antrópicos. Afinal, desenvolvimento sustentável é aquele que “procura satisfazer as demandas da geração atual, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades”, sejam elas de bens e recursos materiais ou de referenciais simbólicos (UNITED NATIONS BRUNTLAND COMMISSION, 1987). Nesse contexto, a preservação do patrimônio é uma “ação inclusiva, que beneficia não apenas alguns setores no presente, mas a sociedade de um modo mais abrangente ao longo do tempo. Ou seja, permite que presente e futuro entrem em contato com um universo mais variado, assegurando a diversidade” (KÜHL, 2008). Vinte anos depois da primeira conferência, o documento final da Rio+20 reconhece o imperativo da preservação do patrimônio natural e cultural dos assentamentos humanos, incluindo a revitalização de áreas históricas e a reabilitação dos centros urbanos (UNITED NATIONS CONFERENCE ON SUSTAINABLE DEVELOPMENT - RIO+20, 2012).

A preservação do patrimônio edificado guarda uma série de correlações com os paradigmas de desenvolvimento urbano sustentável. Ao preservar, restaurar e reabilitar edifícios concentrados nos núcleos fundadores das cidades, otimiza-se o uso do solo onde já há infraestrutura e rede de serviços instalados. Reduzem-se os impactos relacionados às grandes obras viárias e com o transporte casa-trabalho-lazer dos moradores. A reabilitação contribui para a diminuição da demanda de energia e recursos naturais (incluindo uso do solo) necessários para a construção de novas edificações. Reduz o consumo de energia e emissões de CO₂ relacionados com demolição e transporte de entulhos, bem como diminuição do volume de resíduos lançados no meio-ambiente (FREY; ANDERSON; ANDREWS; WOLF, 2008; LAEFER; MANKE, 2008; MANSFIELD, 2009; POWTER; ROSS, 2005; RYPKEMA, 2006; SEDOVIC; GOTTHELF, 2010). As edificações antigas utilizam materiais e estruturas passíveis de reparação e manutenção, em oposição a componentes construtivos contemporâneos que não possibilitam reparos para prolongar sua vida útil (POWER, 2008; POWTER; ROSS, 2005; RYPKEMA, 2006; SEDOVIC; GOTTHELF, 2010). Assim, a reabilitação dinamiza a economia com obras de reforma, manutenção ou reabilitação, mais adequadas às pequenas firmas e mais intensivas em mão de obra, além de utilizarem materiais, tecnologia e trabalhadores locais. Políticas públicas de

reabilitação sustentável do estoque edificado têm grande potencial de criação de empregos, tanto em países desenvolvidos quanto naqueles em desenvolvimento (BALDWINSON, 2012; ILO, 2010). Além disso, a substituição de edificações antigas por novas é lenta, cara, impopular. As edificações “condenadas” à demolição não recebem melhorias, desvalorizando a vizinhança. As áreas centrais degradadas da cidade continuam abandonadas (POWER, 2008; STOVEL, 2011). Ademais, considerando que boa parte dos edifícios históricos encontra-se sem uso, esses constituem uma reserva social para as demandas presentes e futuras de habitação (KOHLER; HASSLER, 2002). No Brasil, os 6,1 milhões de domicílios vazios nos centros urbanos (IBGE, 2010) – muitas vezes, abandonados, degradando áreas urbanas – seriam suficientes para suprir o déficit habitacional nacional de 5,5 milhões de domicílios (BRASIL, 2011). Na Inglaterra, a reabilitação de edificações desocupadas (residenciais, comerciais e industriais) poderia criar 688.763 novos lares (EHA, 2008). Por fim, a preservação proporciona ganhos sociais, ao garantir às cidades a manutenção de suas faculdades simbólicas, preservando práticas culturais, paisagens e ambiências urbanas únicas, definidoras de um referencial de identidade e pertencimento dos seus cidadãos (CAMERON, 2011; FEILDEN, 1982; FITCH, 1982; MANSFIELD, 2009; POWTER e ROSS, 2005; RODWELL, 2007; TWEED e SUTHERLAND, 2007).

No que diz respeito aos assuntos específicos à preservação do patrimônio edificado, a agenda HABITAT II (UN-HABITAT, 1996) não descuidou das preocupações com o meio ambiente. Em seu artigo 154, pontuou que os projetos de preservação do patrimônio assegurem o atendimento dos requisitos atuais de desempenho ambiental. Afinal, as intervenções de conservação, restauração ou reabilitação podem ser tão mais sustentáveis quanto incorporem medidas de racionalização do consumo de recursos naturais e energia, evitando desperdícios e promovendo melhorias no desempenho energético da edificação. Recursos despendidos na ampliação da capacidade de geração e transmissão de energia para atender o aumento no consumo de energia pelo estoque edificado poderiam ser destinados a outras áreas essenciais, como saúde, educação e segurança alimentar.

Dentre as categorias de preservação do patrimônio edificado, a reabilitação é a que melhor se enquadra no objetivo de adequar as edificações históricas a novos padrões de uso e desempenho, inclusive ambiental. A reabilitação visa

atualizar e permitir uma nova abordagem de um imóvel antigo, no sentido de se obter dele melhor resultado e eficiência, a partir de sua total integração no cotidiano da sociedade que o preservou, sem, contudo, descaracterizá-lo (RIBEIRO, 2008).

2.1.1 A reabilitação de edificações de interesse para preservação

A reabilitação de edificações históricas requer um equilíbrio, muitas vezes delicado, entre a manutenção da integridade do edifício e o atendimento das exigências atuais de manutenção, segurança, acessibilidade, conforto e desempenho. A problemática não se resume a introduzir materiais, equipamentos e sistemas novos em um edifício histórico, respeitando sua significância, integridade, autenticidade e, também, a reversibilidade da intervenção – princípios fundamentais da teoria da preservação do patrimônio arquitetônico. Prescritos em cartas e convenções internacionais, os fundamentos teóricos da preservação reúnem os critérios básicos para intervenção no patrimônio edificado, de forma a salvaguardar os elementos que lhe atribuem valor cultural. A reabilitação deve, então, preservar e, se necessário, resgatar esses valores, os quais são a base para a definição das intervenções e tratamentos que serão empregados na edificação histórica.

No âmbito da reabilitação, o valor de uso destaca-se em importância. Edifícios reabilitados têm seu valor econômico restabelecido e veem revertida sua obsolescência. A reabilitação é, pois, uma alternativa adequada à revitalização do patrimônio arquitetônico do Movimento Moderno e demais arquiteturas do passado recente (FEILDEN, 2003). Desprovidos de “valor de antiguidade”, esses edifícios não são reconhecidos como patrimônio pelo senso comum, dependendo necessariamente do valor de uso para sua preservação. Ademais, ainda que relativamente não tão antigos, os edifícios modernistas já demandam investimentos em manutenção e renovação: de forma geral, pagam a conta do

vanguardismo ao terem introduzidos novos materiais e sistemas construtivos então pouco testados quanto à durabilidade. Por outro lado, introduziram conceitos de projeto – como a planta livre e a estrutura independente – que não somente são ainda atuais, como também facilitam sobremaneira as intervenções de readequação de uso, constantes em ações de reabilitação (ANELLI; SANCHES, 2005).

A arquitetura moderna disseminou-se mundo afora sem grandes regionalizações, e norteou o projeto não só de inúmeros prédios públicos, mas também de um grande estoque de edifícios comerciais e residenciais. Além disso, perfazem aquela que deve ser a parcela mais energeticamente ineficiente do parque edilício (ELEFANTE, 2007; FEILDEN, 2003; FREY; ANDERSON; ANDREWS; WOLF, 2008). Essas edificações foram construídas após a virada tecnológica dos anos 1920. Naquela época, o uso do aço e do concreto armado nas construções, que libertou as vedações verticais de sua função estrutural, também reduziu substancialmente a massa térmica das construções e possibilitou a ampliação das áreas de aberturas nas fachadas. As consequências nem sempre foram positivas ao desempenho térmico das edificações, que vieram a apresentar um aumento significativo no consumo de energia. Esse quadro somente se reverteu com o advento dos regulamentos de eficiência energética na década de 1970 (TOMMERUP; SVENDSEN, 2006; YOUNG, 2011).

No Brasil, apesar de sua propalada adequação bioclimática (BARP; MACHADO; SCHMID, 2008; PORTO; FONSECA; ROCHA; RAMAZZINI; *et al.*, 2009; SEGRE; VILAS BOAS; LEITÃO, 2009; SZABO; FRETIN; SALADO; MARTINELLI; *et al.*, 2004; TINEM, 2006), a arquitetura modernista brasileira enverga dispositivos passivos de controle ambiental – como *brise-soleil*, cobogós, pilotis – que nem sempre foram bem empregados (KLÜPPPEL, 2006; MELENDO, 2004; SAIBROSA; AMORIM, 2006). Esses edifícios dependem, via de regra, de equipamentos de refrigeração para proporcionar níveis de conforto satisfatórios aos seus ocupantes. Não concebidos para tal, terminam por incorrer em um maior consumo de energia, além de passarem por adaptações inadequadas e sem critério. Não raro, os *brise-soleils*, elementos marcantes do modernismo brasileiro, acabam por tornarem-se suportes para a instalação de aparelhos de condicionamento de ar (ver Figura 2.1).

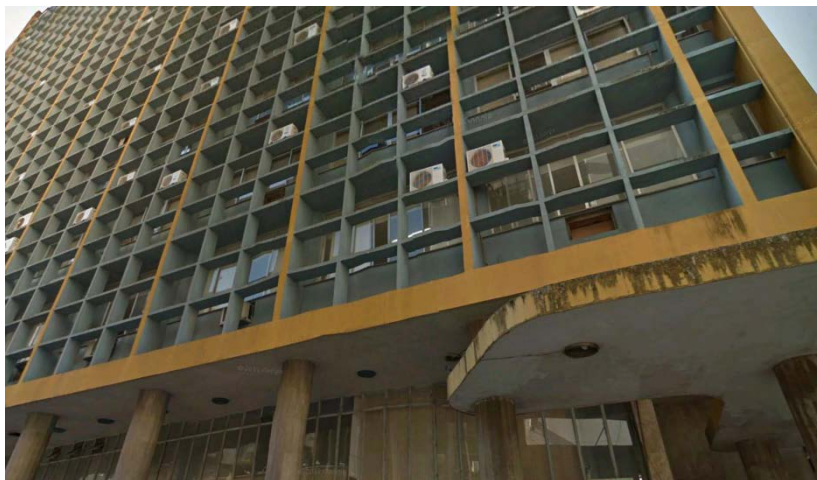


Figura 2.1 – Adaptações inadequadas em edifícios históricos: aparelhos de ar-condicionado instalados sobre os brise-soleil de edifício modernista em Florianópolis, SC, Brasil.

Fonte: <http://maps.google.com.br>, acessado em 20/08/2012.

Não obstante, é bastante provável que, no Brasil, o desempenho energético dos edifícios modernistas não esteja aquém daquele apresentado pelas novas edificações. O regulamento brasileiro de eficiência energética em edificações é bastante recente, o que resulta em construções que prezam o menor custo em detrimento da qualidade construtiva.

Por conta de sua relevância e representatividade (SEGAWA, 1999), reconhecimento internacional, (GOUVEIA, 2009) e dispersão pelo território nacional, os edifícios modernistas oferecem um terreno fértil para políticas de reabilitação, com benefícios potencialmente significativos ao meio ambiente.

2.1.2 Oportunidades e desafios na reabilitação de edificações

Não há dúvidas de que o estoque edificado constitui um recurso fundamental para a atenuação dos problemas ambientais, econômicos e sociais. É imperativo reabilitar as edificações históricas às exigências de uso e conforto contemporâneos, sem descuidar do desempenho. Contudo, os incentivos para

investimentos nos edifícios antigos muitas vezes esbarram justamente nas políticas – ou na falta de políticas – voltadas para a eficiência energética e desempenho ambiental das edificações (BAEK; PARK, 2012). De forma geral, as políticas públicas desse gênero são focadas, de modo quase que excludente, nas novas edificações.

Soma-se a essa situação a precedência dada às novas construções pelos cada vez mais populares sistemas de certificação de edifícios verdes. Surgidos no início dos anos 1990, os sistemas de certificação estabelecem procedimentos para avaliar edificações de acordo com critérios de sustentabilidade. São exemplos de sistemas de certificação de edificações o BREEAM, do Reino Unido; o LEED, dos Estados Unidos; o *GBTool*, desenvolvido no Canadá; o HQE da França; dentre outros semelhantes. Embora apresentem variações de escopo e abordagem, todos foram desenvolvidos para auxiliar a definir parâmetros de desempenho ambiental das edificações. Classificam os edifícios de acordo com uma série de quesitos como: política de gerenciamento ambiental; uso do solo, água e energia; emissão de gases do efeito estufa; materiais empregados; qualidade do ar interno etc. Entretanto, atribuem pouco crédito ao reaproveitamento de edifícios antigos. Os materiais são mais bem avaliados em termos de seu potencial para reciclagem do que das vantagens de sua retenção no edifício existente (FREY, 2007; JACKSON, 2005, 2010; LEE; TRCKA; HENSEN, 2010; POWTER; ROSS, 2005; RYPKEMA, 2006). Ocorre que a própria reciclagem de materiais pode consumir grandes quantidades de energia ou, também, dar origem a produtos de qualidade inferior, algo que não ocorre no caso de sua manutenção na edificação.

A preocupação com o desempenho energético dos edifícios históricos foi a primeira a aparecer sublinhada nas normas e diretrizes de preservação que trataram das questões ambientais relacionadas do patrimônio edificado. Países como Estados Unidos, Canadá e Austrália já incorporam, nas normativas de preservação, orientações para reduzir o consumo de energia de seus edifícios históricos (LIEUX PATRIMONIAUX DU CANADA, 2010; TECHNICAL ADVISORY COMMITTEE OF THE HERITAGE COUNCIL OF VICTORIA, 2009; U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR, 1990). Referenciam-se, aqui, apenas aqueles países cujo alcance temporal do patrimônio

construído é comparável ao do Brasil, embora não tenham sido pioneiros.

Entretanto, de forma geral os regulamentos de eficiência energética para edificações empregam maior ênfase ao projeto de novas edificações, em detrimento de melhorias em edificações existentes. Esses instrumentos, de forma geral, comparam o desempenho da edificação em avaliação com o desempenho de edificação normalizada com parâmetros do nível de eficiência desejado. Ou, ainda, com *benchmarks* de edificações de referência. Os parâmetros e edificações de referência, por óbvio, são estabelecidos com base nos materiais, normas e sistemas construtivos atuais. Como consequência, as escalas e critérios de avaliação deles derivados terminam por não avaliar corretamente o desempenho de edificações mais antigas. No sistema brasileiro de etiquetagem do nível de eficiência energética de edificações, a única menção a edifícios históricos aparece no item 4.2 dos Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (MDIC/INMETRO, 2010). Essa referência desobriga da avaliação da eficiência do sistema de iluminação os sistemas complementares de iluminação das edificações tombadas. Além disso, essa prerrogativa acaba por desonerar os projetistas de uma eventual obra de reabilitação de pensarem em soluções de conservação de energia. Isso justamente onde, em se tratando de uma edificação histórica, os aperfeiçoamentos seriam mais viáveis e de implantação mais fácil: nos sistemas mecânicos e elétricos. De forma geral, nas legislações de proteção do patrimônio as intervenções no envoltório são as mais restringidas.

A lei federal de proteção do patrimônio cultural brasileiro é uma das mais antigas em vigor no país (BRASIL, 1937). Contudo, a reabilitação urbana – que abarca necessariamente a reabilitação de edificações –, ainda é uma política incipiente enquanto estratégia de preservação de sítios históricos protegidos (BRITO, 2002). Pensar o patrimônio edificado sob a ótica ambiental, de conservação de recursos naturais e de energia, então, ainda está longe de ser uma realidade na prática patrimonial e nas políticas urbanas.

2.2 O PENSAMENTO EM CICLO DE VIDA E A REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS EXISTENTES

A building is much more than a 'thermal envelope' that transmits or conserves energy, or a locus for indoor energy consumption. The built environment, and the buildings which comprise it, are a fundamental part of a country's culture and heritage. They are likely to have evolved over centuries in response to local climate, topography, materials, history, security concerns and a host of other factors
(EKINS; LEES, 2008).

Para avaliar a viabilidade ambiental de diferentes alternativas para a construção de edifícios, o pensamento em ciclo de vida é uma abordagem solidificada, sendo cada vez mais utilizada no processo de decisão. Trata-se de um enfoque no qual um sistema, seja ele a fabricação de um produto ou a execução de um serviço, tem seu ciclo de vida desdobrado em etapas, de forma a identificar as oportunidades de aperfeiçoamento no seu desempenho ambiental. Essas etapas podem ir desde a extração das matérias-primas para sua fabricação (o “berço”), até a disposição final de seus resíduos em fim de vida (“túmulo”). Estágios intermediários podem ser definidos pelos processos de manufatura envolvidos até a saída do produto da fábrica (um dos “portões”), transporte ao local de uso (o canteiro, no caso de uma edificação) e, também, a utilização do produto. Há ainda a possibilidade de reciclagem dos materiais com seu reaproveitamento no mesmo ciclo (retornando-os ao berço). Um estudo de ciclo de vida pode abranger todos esses estágios (do tipo *cradle-to-grave*, indo do berço ao túmulo), ou apenas parte deles (*cradle-to-gate*, se parar na saída do produto da fábrica; *cradle-to-site*, até o canteiro; ou *cradle-to-cradle*, quando envolve reciclagem). Em cada uma dessas etapas que, no caso de uma edificação, estão representadas na Figura 2.2, são caracterizadas as perturbações ao meio ambiente e o uso de recursos envolvidos.

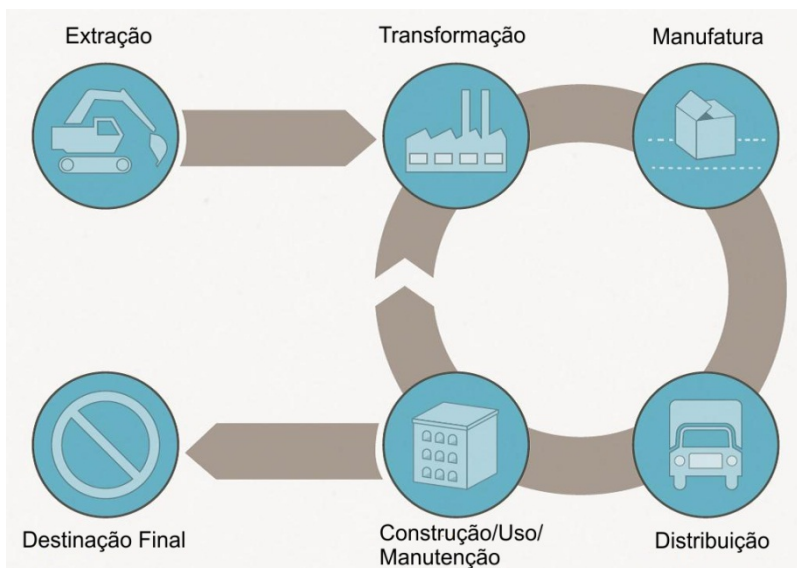


Figura 2.2 – Ciclo de vida típico de edificações.

Fonte: adaptado de *National Trust for Historic Preservation* (2012).

O desenvolvimento da abordagem em ciclo de vida foi fomentado nos anos 1990, na América do Norte e na Europa, pela Sociedade Internacional para a Química e Toxicologia Ambiental (SETAC). Internacionalmente, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) associou-se à SETAC na promoção do pensamento em ciclo de vida. Por meio do projeto *Life Cycle Initiative*, atuam no fomento a ferramentas e na difusão da análise de ciclo de vida, sobretudo em países em desenvolvimento. Os trabalhos da SETAC serviram para estruturar as primeiras normatizações de metodologias para estudos de ciclo de vida. Uma das iniciativas pioneiras partiu da *Canadian Standards Association* (Canadá), em 1994 (BARDY, K.; PAYNTER, A., 1996 *apud* KHASREEN, BANFILL e MENZIES, 2009). O estado-da-arte é a análise de ciclo de vida (ACV)², regulada pelas normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006, com equivalentes brasileiras (ABNT, 2009a, 2009b).

² O termo em inglês *life cycle assessment* admite tradução como avaliação de ciclo de vida ou análise de ciclo de vida, sendo ambas

Na análise de ciclo de vida de uma edificação, podem ser quantificadas as cargas ambientais desde a extração de matérias-primas, produção e transporte de materiais para o canteiro; passando pela construção, operação, manutenção e reforma do edifício; até a demolição e destinação final dos materiais de construção. As cargas ambientais do ciclo de vida de edificações podem ser, então, categorizadas em impactos potenciais (Figura 2.3).

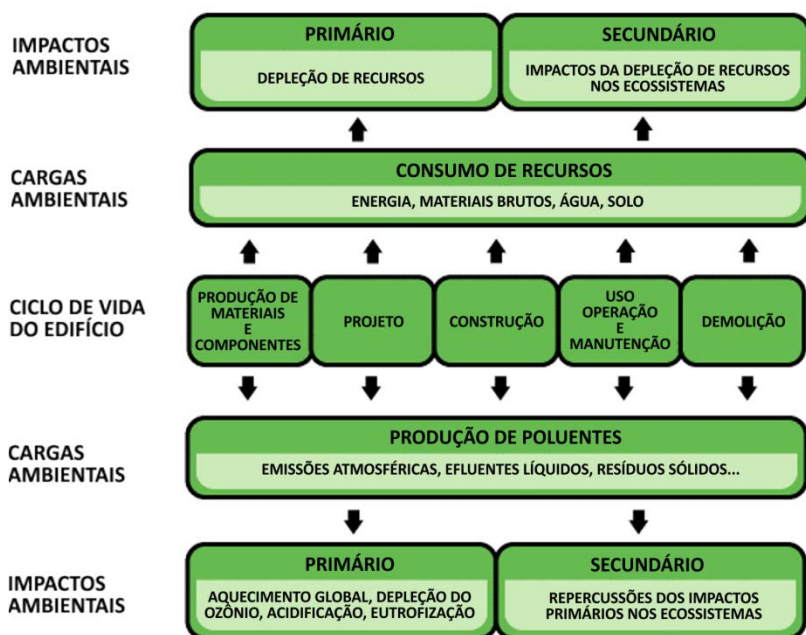


Figura 2.3 – Cargas e impactos ambientais relacionados com o ciclo de vida de edificações.

Fonte: Adaptado de IEA *Annex 31 Energy-Related Environmental Impact of Buildings* (2001).

utilizadas em publicações no Brasil. A Associação Brasileira de Ciclo de Vida (ABCV) utiliza em seu sítio na internet (www.abcvbrasil.org.br/oqueeacv.php, acessado em 08/02/2012) o termo análise, que será adotado neste trabalho.

Algumas definições importantes transcorrem cada uma dessas etapas. O consumo de recursos e energia e os impactos associados com a fabricação, transporte e instalação dos materiais e componentes utilizados na construção são chamados de efeitos incorporados iniciais. Durante sua vida útil, a edificação certamente receberá acréscimos de energia e materiais devido a reformas, manutenção ou ampliações; as entradas e saídas relacionadas configuram os efeitos incorporados recorrentes. Os efeitos de operação tratam dos impactos e do consumo de água e energia pela utilização rotineira da edificação. Por fim, os efeitos de final de vida referem-se aos impactos provenientes da demolição da edificação, reciclagem dos materiais ou destinação final dos resíduos (TRUSTY, 2006).

Análises de ciclo de vida têm sido aplicadas como ferramenta de apoio à decisão e eco-concepção ou como método de avaliação de etiquetas ambientais, como é o caso das Declarações Ambientais de Produtos (EPD, definidas na ISO 14025). Como apoio à decisão, a análise de ciclo de vida estabelece-se como um procedimento comparativo. É sempre atrelada à função do produto ou serviço em estudo. Isto é, comparam-se produtos/serviços de mesmo uso decorrentes de processos diversos ou, então, processos diferentes que resultam em produtos/serviços que cumpram a mesma função (SOARES; SOUZA; PEREIRA, 2006). Alguns métodos de avaliação ambiental também podem ser tratados como métodos de análise de impacto de ciclo de vida, desde que aplicados a partir de procedimentos de análise de ciclo de vida (ALVARENGA; SILVA JÚNIOR; SOARES, 2012). É o caso, por exemplo, da *Ecological Footprint*, ou “Pegada Ecológica”. A Pegada Ecológica integra a ocupação direta e indireta de diferentes tipos de territórios produtivos (agrícola, pastagens, oceanos, florestas e áreas construídas) na área necessária para produzir os recursos demandados por uma determinada população, bem como para absorver os impactos gerados pelo consumo desses recursos. A ocupação indireta refere-se ao uso de energia nuclear e às emissões de CO₂ relacionadas ao consumo de combustíveis fósseis (HUIJBREGTS; HELLWEG; FRISCHKNECHT; HUNGERBÜHLER; *et al.*, 2008).

No caso de uma abordagem mais holística, análises de ciclo de vida podem ser combinadas a outros instrumentos que envolvam outras esferas de avaliação (KOHLENER; MOFFATT, 2003). Com exemplos desses instrumentos, podem-se citar: as análises de custo de ciclo de vida; análises sociais de ciclo de vida; métodos de avaliação de impacto cultural (para intervenções em edifícios ou sítios históricos); e, inclusive, métodos de avaliação da significância, integridade e autenticidade do patrimônio construído, como aquele proposto por Zancheti e Hidaka (2011, 2012).

2.2.1 A técnica de análise de ciclo de vida

Sendo a análise de ciclo de vida uma abordagem quantitativa de um sistema, o cerne de sua estrutura é o levantamento das cargas ambientais envolvidas na execução de um serviço ou na fabricação de um produto – o inventário de ciclo de vida. Trata-se de um balanço de massa-energia, no qual se detalham, para cada um dos processos elementares envolvidos no sistema, todos os fluxos elementares, ou seja, todos os insumos e energia retirados ou liberados no meio ambiente sem sofrer transformação humana. Um processo elementar é o menor fragmento considerado na quantificação de entradas e saídas (de matéria e energia) no ciclo de vida de um sistema (ABNT, 2009a, 2009b). Como exemplo, a Tabela 2.1 apresenta as entradas do inventário de ciclo de vida da produção de 1t de vidro plano, enquanto a Tabela 2.2 demonstra as saídas de poluentes gerados na produção da mesma massa de vidro.

Dados como esses podem ser obtidos por meio da análise do processo produtivo, com medições diretas das quantidades de insumos necessárias e da matéria e energia produzida no sistema. Outra forma de levantamento de dados para o inventário de ciclo de vida é a partir de matrizes insumo x produto (*input-output*), tendo por base dados gerais dos setores produtivos envolvidos no sistema. Diante da complexidade e quantidade de materiais abrangidos na análise de ciclo de vida de edificações, é comum a realização do inventário a partir de matrizes híbridas, que combina dados levantados por métodos de análise de processo e *input-output* (FAY; TRELOAR; IYER-RANIGA, 2000; ITARD; KLUNDER, 2007; SUH; LIPPIATT, 2012). “Do ponto de vista prático, o inventário de diferentes fluxos elementares de materiais utilizados em construção

civil estaria disponibilizado em um banco de dados contendo, por exemplo, cimento, pisos, azulejos, pintura, etc.” (SOARES; SOUZA; PEREIRA, 2006).

Tabela 2.1 – Entradas de matéria e energia para a produção de 1t de vidro plano

Matéria-prima	t
Sílica	0,61
Carbonato de Sódio	0,19
Dolomita	0,15
Carbonato de Cálcio	0,04
Sulfato de Sódio	0,01
Outras substâncias	kg
Estanho	0,02
Hidrogênio	0,50
Nitrogênio	80,07
Consumo de Água	m ³
Água do Processo	0,13
Água do Resfriamento	0,07
Energia	Consumo
Energia elétrica	282,92 kWh
Energia térmica	10,56 GJ

Fonte: Baseado em Gadea (2010).

Tabela 2.2 – Emissões atmosféricas para a produção de 1t de vidro plano

Substância	Emissão (kg/t.vidro)
O ₂	250,90
CO ₂	0,71
SO ₂	0,65
NO _x	3,91
Material Particulado	0,39

Fonte: Baseado em Gadea (2010).

Entretanto, antes da realização do inventário de ciclo de vida é necessário especificar qual será a aplicação da análise de ciclo de

vida e quais informações serão demandadas. A primeira fase de uma análise de ciclo de vida passa, então, pela definição do objetivo e do escopo do estudo. Essa fase inclui a determinação das fronteiras do sistema – ou seja, a especificação de quais processos elementares serão considerados no estudo. Envolve ainda a determinação da unidade funcional – o critério quantificado de desempenho do sistema utilizado como um fator de referência e de comparação (ABNT, 2009a, 2009b). No exemplo de uma edificação, a unidade funcional poderia ser, por exemplo, a construção como um todo ou uma unidade definida de área útil, analisados durante um período determinado (SOARES; SOUZA; PEREIRA, 2006). Para materiais de construção, a unidade funcional poderia ser expressa por unidade de massa. A *American Society for Testing and Materials* possui normas complementares à ISO14044 (ABNT, 2009a) tanto para a análise de ciclo de vida de edificações como um todo – a ASTM E2921-13 (ASTM, 2014) – quanto para materiais e componentes – a ASTM E1991-05 (ASTM, 2012).

Depois de arrolados, os dados do inventário são, então, associados às diferentes categorias de impacto envolvidas em cada uma das fases do ciclo de vida da edificação, subsidiando análises sobre suas consequências ambientais e econômicas (SOARES; SOUZA; PEREIRA, 2006). Assim, o passo seguinte é a análise de impacto do ciclo de vida. Nessa fase, as cargas ambientais compiladas quando do inventário são agregadas e caracterizadas em termos de impactos ambientais potenciais. É uma etapa crucial para a “avaliação da magnitude e significância dos impactos ambientais” associados ao sistema avaliado (ABNT, 2009a, 2009b). A norma ISO14044 (ABNT, 2009a) prescreve que os fatores de caracterização de impactos de ciclo de vida sejam baseados em modelos que relacionem as intervenções humanas a um conjunto de áreas de interesse a serem ambientalmente protegidas.

Existem dois tipos principais de métodos para a realização de análises de impacto de ciclo de vida: aqueles orientados aos problemas (conhecidos como abordagem *midpoint*); e outros orientados aos danos (abordagem *endpoint*). O *endpoint* é efeito final do sistema na área a ser protegida, enquanto *midpoint* são os efeitos intermediários, determinados em termos de indicadores. Nas abordagens *midpoint* os fluxos elementares são classificados de

acordo com impactos ambientais para os quais contribuem, por exemplo: as mudanças climáticas, o esgotamento dos recursos naturais, a destruição da camada de ozônio, acidificação, produção fotoquímica de ozônio, eutrofização, toxicidade humana e toxicidade aquática. Os métodos *endpoint* também classificam os diversos fluxos de um sistema em vários temas ambientais. Mas, estes se relacionam aos campos de interesse de proteção final, como: a saúde humana, a diversidade dos ecossistemas, a preservação de recursos naturais e minerais e o meio-ambiente antrópico (GOEDKOOP; HEIJUNGS; HUIJBREGTS; SCHRYVER; *et al.*, 2012). A diferença significativa entre as duas abordagens está na forma de comunicar os resultados de uma análise de impacto ciclo de vida. O *Eco-Indicator 99* é um exemplo de um método orientado aos danos finais. No caso do enfoque nos efeitos intermediários, o CML 2000 é um método de avaliação de impacto de ciclo de vida bastante conhecido (EUROPEAN COMMISSION JRC; IES, 2010). Alguns modelos de análise de impacto de ciclo de vida combinam abordagens tanto no nível *midpoint* quanto no nível *endpoint*, como o *ReCiPe*. O *ReCiPe* propõe vincular os dados provenientes do inventário de ciclo de vida à uma ou mais categorias *midpoint*. Estas são, então, vinculadas a uma categoria *endpoint*. Para cada categoria, tanto no nível *midpoint* quanto no nível *endpoint*, existe um indicador e um fator de caracterização correspondente (GOEDKOOP; HEIJUNGS; HUIJBREGTS; SCHRYVER; *et al.*, 2012). O *ReCiPe* avalia três categorias de impacto *endpoint* relacionadas à três dos quatro campos de proteção ambiental – saúde humana, qualidade dos ecossistemas e disponibilidade de recursos. O fato de o *ReCiPe* operar tanto em categorias *midpoint* quanto em categorias *endpoint* permite expor de diferentes formas os resultados da análise de ciclo de vida: ora enfatizando os impactos ambientais, ora os danos. O *ReCiPe* possibilita ainda a agregação das categorias *endpoint* em um indicador único, facilitando a comparação de cenários diversos.

Exemplificando a relação de uma categoria *midpoint* com as categorias *endpoint* no *ReCiPe*, as mudanças climáticas são responsáveis por uma série de consequências ambientais que afetam tanto a saúde humana quanto a qualidade dos ecossistemas. No que diz respeito à categoria *endpoint* danos à saúde humana, as mudanças climáticas, reflexos do aquecimento global, contabilizam

mortes e incapacitações – temporárias ou permanentes – provocadas por desastres ambientais ou por doenças infecciosas, cardiovasculares e respiratórias. O indicador empregado no *ReCiPe* para o campo da saúde humana é o DALY (*disability-adjusted loss of life years*), indicador desenvolvido para a Organização Mundial de Saúde (MATHERS; VOS; LOPEZ; SALOMON; *et al.*, 2001). O DALY integra o tempo de vida perdido por morte prematura e o seu equivalente em anos de vida subtraídos devido a condições de deficiência de saúde (GOEDKOOP; HEIJUNGS; HUIJBREGTS; SCHRYVER; *et al.*, 2012; MCKENNA; ZHRABIAN, 2009). O DALY para uma dada doença – e já existem disponíveis valores de DALY para uma série de enfermidades – é derivado de estatísticas sobre a saúde humana. No *ReCiPe*, a biodiversidade é o parâmetro utilizado para analisar a qualidade dos ecossistemas. O indicador empregado é o PDF (Potencial de Desaparecimento de Espécies), dado na unidade espécies x ano. Os danos aos recursos abióticos no *ReCiPe* são quantificados em termos dos custos excedentes aos quais as futuras gerações serão submetidas para extrair recursos minerais e combustíveis fósseis. O custo extra é função da redução da qualidade e quantidade dos recursos nas jazidas, considerada uma inflação de 3% (GOEDKOOP; OELE; SCHRYVER; VIEIRA; *et al.*, 2010).

Existem também outras formas de agregação dos resultados de uma análise de ciclo de vida. Weidema (2009), por exemplo, propôs um método para monetizar as categorias de danos à saúde humana, ao meio ambiente e à disponibilidade de recursos do *EcoIndicator*, método do qual se derivaram as mesmas categorias no *ReCiPe*. A caracterização de danos ambientais em termos monetários ainda possibilita integrar aspectos econômicos e sociais à análise de ciclo de vida (WEIDEMA, 2006), bem como incorporar seus resultados em políticas públicas baseadas em incentivos financeiros.

A etapa final de uma análise de ciclo de vida, embora também perpassasse todas as anteriores, é a fase de interpretação dos resultados do inventário e da avaliação de impacto. É a partir da interpretação desses resultados, sem perder de vista o objetivo e o escopo anteriormente definidos para o estudo – e revendo-os, se necessário –, que se baseiam a tomada de decisão e as conclusões da análise de ciclo de vida (ABNT, 2009a, 2009b).

A Figura 2.4 sumariza graficamente a estrutura da análise de ciclo de vida tratada neste item:

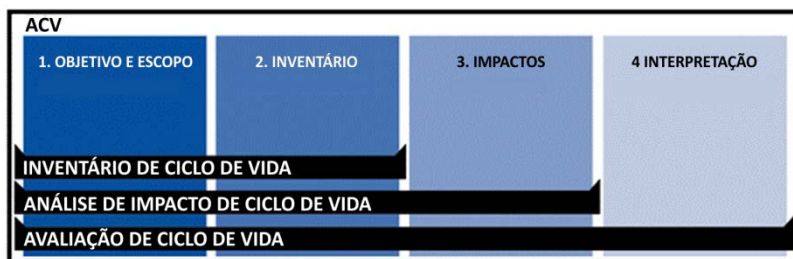


Figura 2.4 – Estrutura de uma análise de ciclo de vida.

Fonte: Adaptado de IEA Annex 31 *Energy-Related Environmental Impact of Buildings* (2001b).

2.2.2 A análise de ciclo de vida na avaliação do desempenho ambiental de edificações

O conceito de ciclo de vida fora inicialmente concebido para avaliar processos industriais de aplicação menos complexos que a construção uma edificação. Entretanto, “o princípio utilizado na escolha de um material, em um conjunto de opções que cumprem uma mesma função, pode ser utilizado na concepção de uma edificação composta de vários materiais” (SOARES; SOUZA; PEREIRA, 2006). Na literatura, podem-se encontrar análises de ciclo de vida de materiais de construção e combinações de componentes (BMCC, do inglês *Building Materials and Component Combinations*) ou do processo global de construção do edifício (WPC, de *Whole Process of Construction*) (KHASREEN; BANFILL; MENZIES, 2009; ORTIZ; CASTELLS; SONNEMANN, 2009). As primeiras são baseadas nos processos industriais de produção e a unidade funcional é focada no produto final, por exemplo: um metro quadrado de piso cerâmico; uma unidade de luminária. As do segundo tipo baseiam-se nos projetos e especificações do edifício e a unidade funcional, em geral, é a área útil da edificação (REITER, 2010).

Procedimentos baseados em análise de ciclo de vida podem ser utilizados para avaliar o desempenho ambiental de uma edificação durante todo ou parte de seu ciclo de vida ou, ainda, para comparar

diferentes alternativas de projeto. Segundo Soares, Souza e Pereira (2006), “todas as etapas construtivas e gerenciais de uma obra passariam por um processo de ACV, de modo a que se considere a menor repercussão ambiental, associada ao seu ciclo de vida: construção, uso e demolição”.

A análise de ciclo de vida pode ainda ser aplicada de forma mais ampla, como na avaliação da viabilidade ambiental da reabilitação de edifícios existentes, possibilitando um novo estágio de vida útil (Figura 2.5).

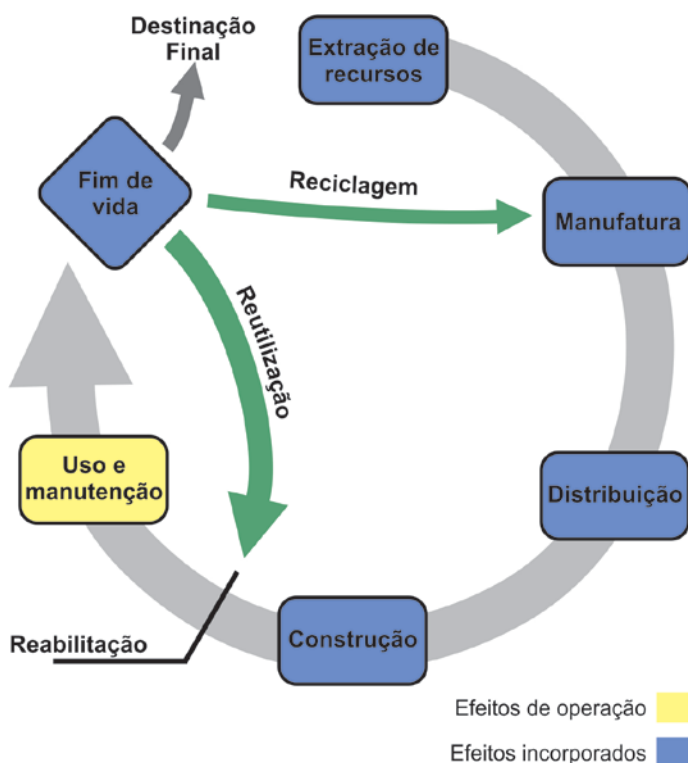


Figura 2.5 – Ciclo de vida prolongado de uma edificação, quando considerada a possibilidade de sua reabilitação.

Análises de ciclo de vida de reabilitações demandam diferentes etapas de levantamento de dados e cálculos de efeitos. Envolvem,

pelo menos, um cenário anterior à reabilitação e outro(s) cenário(s) posterior(es) à intervenção, reutilizando grande parte de componentes e estruturas já construídas. São necessários, portanto, cuidados específicos para evitar entradas duplicadas de dados ou erros de julgamento.

Um bom exemplo da finalidade de uma análise de ciclo de vida são os estudos que consideram o fluxo de energia ao longo do ciclo de vida de edificações para avaliar a viabilidade da implantação de medidas de eficiência energética. Uma análise desse tipo considera apenas o fluxo de energia como vetor de impacto ambiental de um produto ou de um serviço. O consumo de energia para a calefação ou refrigeração de uma edificação, na sua fase de operação, pode ser reduzido com melhorias no desempenho térmico de seu envoltório. Dependendo da zona climática onde se localiza a edificação, isso pode ser feito adicionando-se camadas de isolamento térmico nas paredes, pisos e cobertura e/ou janelas de vidros duplos, por exemplo. Medidas como essa incorrem, por um lado, em um aumento na energia incorporada na edificação, acompanhada dos impactos ambientais correlatos. Por outro, reduzem o consumo de energia necessário para sua operação. Nesse caso, são comparadas diferentes alternativas de projeto, e escolhe-se aquela com um menor consumo total de energia. A escolha pode recair, inclusive, sobre a possibilidade de não realização das medidas de eficiência. Pesquisas considerando esse balanço entre energia incorporada e de operação são relativamente recorrentes na literatura, dos quais diversos estudos foram elencados por Ramesh, Prakash e Shukla (2010) e Sartori e Hestnes (2007). As pesquisas analisadas demonstram que o consumo de energia para a operação das edificações facilmente supera a energia incorporada em sua construção. Tal constatação poderia levar à conclusão de que não se justifica depreender esforços em inventários de energia incorporada ou mesmo em análises de ciclo de vida (TRUSTY, 2006). Entretanto, na medida em que as edificações devam tornar-se cada vez mais eficientes, o fiel da balança entre a energia incorporada e a energia de operação tende a mudar de lado. Não só pelo fato de consumo de energia na operação diminuir e, portanto, pesar menos no cômputo geral, mas, também, por que edificações mais eficientes podem vir a ser mais complexas em sua concepção;

ou seja, de forma geral, incorporam mais matéria e energia (GOLDSTEIN; BURT; HORNER; ZIGELBAUM, 2010).

Diferentes ferramentas informatizadas baseadas em análise de ciclo de vida foram desenvolvidas especificamente para instrumentar a avaliação de desempenho ambiental de edificações, materiais e componentes de construção. De forma geral, essas ferramentas agregam bancos de dados para inventários de ciclo de vida e gerenciam modelos de análise de impacto de ciclo de vida (SOARES; SOUZA; PEREIRA, 2006). O IEA *Annex 31 Energy-Related Environmental Impact Of Buildings* (2001b) mantém um diretório de instrumentos para análise de ciclo de vida de edificações. Entre programas computacionais e bases de dados, diversos foram descritos e avaliados por Erlandsson e Borg (2003), Haapio e Viitaniemi (2008) e Khasreen, Banfill e Menzies (2009). Como exemplos consolidados têm-se o *Building Products Life Cycle Inventory*, desenvolvido pelo BPIC (*Building Products Innovation Council*), da Austrália (BPIC, 2011); o *Inventory of Carbon & Energy*, base de dados mantida pela Universidade de Bath, no Reino Unido (HAMMOND; JONES, 2011); o *EcoCalculator* e o *Impact Estimator*, disponibilizados pela canadense *Athena Sustainable Materials Institute* (2012); e o BEES (*Building for Environmental and Economic Sustainability*), serviço *online* desenvolvido pelo laboratório de engenharia do *National Institute of Standards and Technology*, nos Estados Unidos (NIST, 2011). Alguns autores também incluem na lista alguns sistemas de certificação ambiental de edificações, como Green Globes, o LEED ou o BREEAM (ORTIZ; CASTELLS; SONNEMANN, 2009; TRUSTY, 2006). Para análises de ciclo de vida detalhadas ao nível dos materiais, também podem ser utilizadas ferramentas desenvolvidas não exclusivamente para edificações, como o *SimaPro* (PRÉ CONSULTANTS, 2012), GaBi (PE INTERNATIONAL, 2012) e o Umberto (IFU HAMBURG GMBH, 2012).

O IEA *Annex 31* comparou os resultados obtidos com a utilização de diferentes ferramentas aplicadas em estudos de caso idênticos – uma edificação residencial e uma edificação comercial. Com cada uma delas, foram obtidos resultados diferentes para as mesmas entradas. Entretanto, apesar das variações entre as saídas calculadas por cada ferramenta, o resultado global foi similar: entre

75 e 95% do impacto ambiental dos edifícios foi atribuído ao consumo de energia na fase de operação (IEA ANNEX 31, 2004a). Bruno e Katrien (2005), em estudo semelhante, utilizando um modelo simplificado e uma edificação completa, encontraram diferenças da ordem de 10% nos resultados da categoria de impacto relacionada ao aquecimento global. Por conta de sua complexidade, a análise do ciclo de vida de edificações pode demandar a utilização de outros recursos como, por exemplo, pacotes de simulação termoenergética. A simulação termoenergética com ferramentas específicas é importante para a quantificação mais apurada dos efeitos de operação, quando o estágio de uso da edificação fizer parte do escopo da análise de ciclo de vida (KOHLE; LÜTZKENDORF, 2002; LEIBRECHT, 2005; WATSON; JONES, 2005).

Khasreen, Banfill e Menzies (2009), Ortiz, Castells e Sonnemann (2009) e Sharma *et al.* (2011) elencaram diversos trabalhos envolvendo análises de ciclo de vida de edificações, materiais ou componentes construtivos. Os autores classificaram os estudos de acordo com as categorias de impacto que analisavam. Ortiz, Castells e Sonnemann (2009) e Sharma *et al.* (2011) também identificaram que, na maioria das pesquisas, destacam-se os impactos ambientais decorrentes da operação das edificações. Khasreen, Banfill e Menzies (2009), entretanto, afirmam que as pesquisas tendem a privilegiar somente as categorias de impacto consideradas mais significativas – como o consumo de energia e as emissões de CO₂. Porém, segundo os autores, aquilo que “não é significativo em um simples edifício pode ser de grande significância na esfera local ou regional”. Daí a importância de se proceder a análises de ciclo de vida tão abrangentes quanto possível.

2.2.3 Problemática da análise de ciclo de vida na reabilitação de edificações

Na temática em tela, a análise de ciclo de vida envolve a comparação entre edificações diferentes – uma existente, reabilitada, e outra a construir. Deve-se, então,

definir e quantificar as características de desempenho e promover a equivalência entre os sistemas analisados. Tais comparações são

estabelecidas tendo-se como base uma mesma função, relacionada a determinada unidade funcional e exercida durante determinado período (SOARES; SOUZA; PEREIRA, 2006).

Em resumo, as edificações comparadas devem abrigar um mesmo uso – por exemplo, escritórios comerciais; devem ser analisadas com base em uma mesma unidade funcional – 1m² de área útil de escritório comercial; e considerando um mesmo período de tempo – 1m² de área útil de escritório comercial com expectativa de vida de serviço de 50 anos. Desse exemplo, podem-se destacar as complicações envolvidas na análise de ciclo de vida de um sistema complexo como uma edificação.

A primeira dificuldade surge na determinação do critério temporal de desempenho a ser contemplado na unidade funcional: a vida útil da edificação. A NBR 15575, primeira norma brasileira a tratar do assunto para a edificação como um todo, define vida útil como “uma medida temporal da durabilidade de um edifício ou de suas partes” (ABNT, 2013). Durabilidade “é a capacidade do edifício e suas partes de manterem ao longo do tempo o desempenho, quando expostos a condições normais de uso” (JOHN, 2000). A vida útil de uma edificação é influenciada pela presença ou ausência de manutenção adequada, e pode ser prolongada, mediante investimentos de reforma, renovação ou reabilitação. Ocorre que, por vezes, o fim da vida de uma edificação não é determinado por aspectos relacionados à durabilidade, ou seja, não é resultado da sua decrepitude ou deterioração da construção, como um todo ou de suas partes. Existe uma série de outros fatores endógenos e exógenos que decretam a obsolescência da edificação, embora esta também possa ser revertida por meio de intervenções de reabilitação (THOMSEN; FLIER, 2011), que dariam início a um novo ciclo de vida útil (ERLANDSSON; BORG, 2003). Em resumo, a vida útil de uma edificação depende de seu valor social e econômico; e pode ser continuamente renovada através de reabilitações sucessivas.

De fato, uma consulta realizada em St. Paul, Minnesota, EUA, constatou que, dentre 227 edificações demolidas entre os anos de 2000 e 2003, 30% tinham menos de 50 anos, e destas 6% não

contavam 25 anos (Figura 2.6). A condição física foi razão para demolição de apenas 31% das edificações, a maioria decorrente de falta de manutenção. A pesquisa também não encontrou nenhuma relação entre a durabilidade prevista para diferentes tipos de construção (o levantamento contemplou construções de alvenaria, madeira, concreto e aço) e a longevidade das edificações (TRUSTY; ARGELES, 2005).

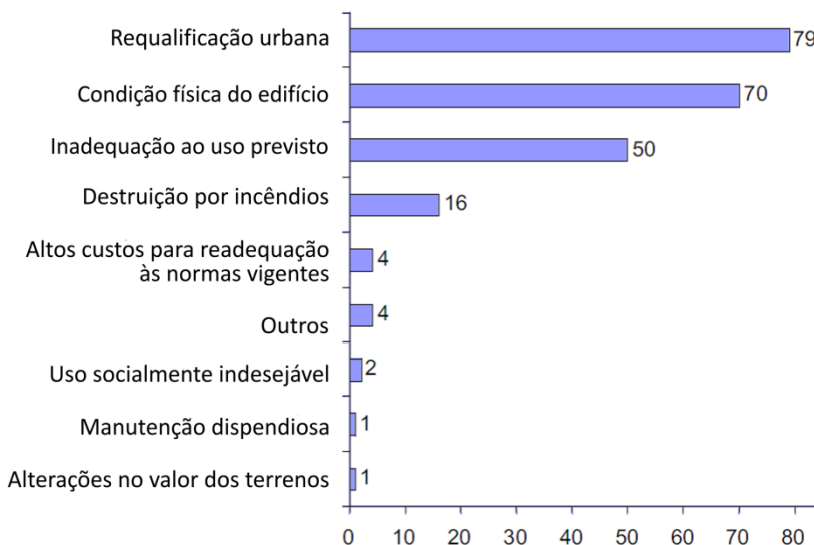


Figura 2.6 – Motivação da demolição de 227 edifícios comerciais e residenciais em St. Paul, Minnesota, EUA, por unidade.

Fonte: Adaptado de Trusty e Argeles (2005).

Aqueles números demandam atenção ao se basear os cálculos de análise de vida de edificações na vida útil estimada, ou seja, na “durabilidade prevista para um dado produto, inferida a partir de dados históricos de desempenho do produto ou de ensaios de envelhecimento acelerado” (ABNT, 2013). Poder-se-ia recorrer ao conceito de vida útil de projeto, ou seja, o período de tempo, expresso previamente, pelo qual se espera usufruir determinado bem. Ocorre que, por exemplo, NBR 15575 esse período pode variar de um mínimo de 30 até 120 anos, já excluídas as categorias de

edificações temporárias e de vida curta (ABNT, 2013). A determinação da vida útil baseada nesse tipo de suposição amplia as margens de incertezas das análises de ciclo de vida (AKTAS; BILEC, 2012). Além disso, a ampla expectativa de vida útil torna mais complexa a análise de ciclo de vida de uma edificação em relação à de outro bem de consumo. Uma edificação pode sofrer mudanças de uso e de desempenho ao longo de seu ciclo de vida – o quê de fato ocorre no caso de uma reabilitação, por exemplo. Isso dificulta a determinação de critérios essenciais na análise de ciclo de vida: a função e o desempenho do produto ou serviço em análise (KOHLE; HASSLER, 2002).

No que diz respeito ao foco de interesse deste estudo, nada garante, ainda, que a edificação existente, uma vez demolida, seja substituída por outra com a mesma concepção espacial e as mesmas dimensões; ou que mantenha essas características após a reabilitação. De outra forma, restaria prejudicada a equivalência de função exigida na análise de ciclo de vida. Por conta disso, muitas vezes recorre-se a uma unidade funcional baseada em unidade de área, o que compensaria diferenças em tamanho entre as edificações comparadas (TRUSTY, 2004). Esta foi a opção, por exemplo, no projeto *The Greenest Building: Quantifying the environmental value of building reuse* (NTHP, 2012), que será retomado no item 2.3.3. Entretanto, a unidade funcional adotada naquele estudo – “prover um pé quadrado de área útil interna por um período de 75 anos” – foi objeto de discussão na revisão crítica daquela análise de ciclo de vida. Em uma das comparações entre diferentes cenários apresentados no estudo – que fora questionada pelo revisor crítico, Pascal Lesage –, o edifício de uma escola elementar, no cenário de nova construção, oferecia 151 pés quadrados por estudante. O outro cenário previa a reabilitação de um edifício escolar que provia 283 pés quadrados por estudante, 87% a mais de área. Esta diferença não deixa clara a equivalência de função entre as duas edificações e levanta dúvidas se o resultado final da comparação seria o mesmo se, por exemplo, fosse utilizada como unidade funcional “prover espaço para a educação de um estudante durante um ano”, conforme sugerido por Lesage (QUANTIS, 2012).

Duas edificações de mesma área útil podem apresentar, ainda, em função de sua concepção espacial, índices de compacidade

completamente diferentes. O índice de compacidade de uma edificação é determinado pela razão entre o perímetro de sua projeção no terreno e o perímetro de um círculo com área equivalente. Quanto maior o índice, menor a área de paredes externas. Consequentemente, é necessária uma menor quantidade de materiais e insumos para sua construção, mesmo que a área útil não se altere. Ademais, provavelmente o desempenho térmico da edificação será diferente (PACHECO; ORDÓÑEZ; MARTÍNEZ, 2012), restando prejudicada a equivalência de função e desempenho exigida em análises de ciclo de vida comparativas.

A questão da comparação por unidade de área ainda se estende para outras problemáticas. Por exemplo, no que diz respeito à ocupação do solo, sobretudo em áreas densamente construídas (LUCIUK; TRUSTY; HUFFMAN; PREFASI, 2010). A unidade funcional em unidade de área permite comparar edificações com gabaritos diferentes, mesmo que tenham a mesma projeção no solo. Um adensamento maior ou menor das edificações – com uma intensidade maior ou menor de uso do solo –, interfere na infraestrutura urbana necessária para as edificações; nas distâncias percorridas e volume de usuários deslocados; no sombreamento entre os edifícios; na área de cobertura disponível para a instalação de painéis fotovoltaicos ou coletores solares etc. (GOLDSTEIN; BURT; HORNER; ZIGELBAUM, 2010). Essa problemática reflete-se também na definição da fronteira do sistema, ou seja, na determinação de quais interferências externas às edificações – ou provocadas por estas – serão incluídas ou excluídas na análise de ciclo de vida (ver Figura 2.7). Os efeitos dessas interferências não poderiam ser desprezados, por exemplo, em análises de ciclo de vida consequenciais. Uma análise de ciclo de vida consequential trabalha com relações causais de decisão, identificando e modelando os processos de fundo ou contorno que são influenciados, ainda que indiretamente, pelo sistema analisado (EUROPEAN COMMISSION - JRC; IES, 2010). O objetivo é fomentar as decisões em impactos mais amplos, através de políticas destinadas a alterar os níveis de produção (BRANDER; TIPPER; HUTCHISON; DAVIS, 2009). Outra abordagem seria a análise de ciclo de vida atribucional. Este tipo considera apenas as relações estequiométricas entre as entradas e saídas informações sobre os impactos dos processos diretamente relacionados ao sistema

avaliado (CURRAN; MANN; NORRIS, 2002). Os princípios de modelagem de análise de ciclo de vida consequential e da atribucional são idênticos. A diferença entre ambas reside nas fronteiras definidas para o sistema, ou seja, na escolha dos processos que serão incluídos na análise (ZAMAGNI; GUINÉE; HEIJUNGS; MASONI; *et al.*, 2012).

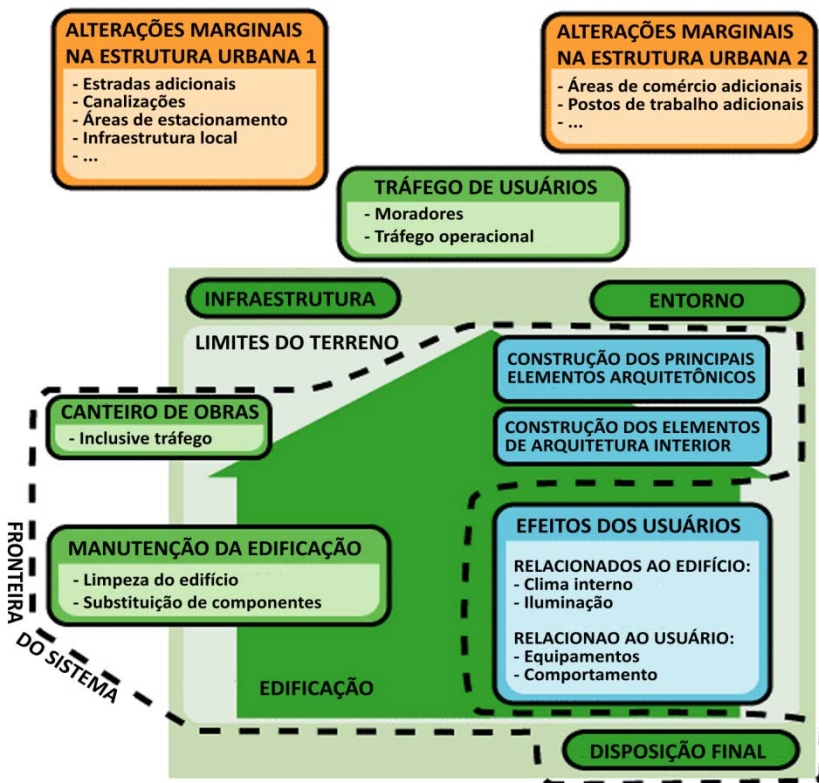


Figura 2.7 – Exemplo de fronteira do sistema para análise de ciclo de vida de edificações.

Fonte: Adaptado de (IEA ANNEX 31, 2001b).

Outra dificuldade frequentemente relacionada à análise de ciclo de vida de edificações é a escassez de dados consistentes, temporal e geograficamente contextualizados, para a realização de inventários de ciclo de vida. Até onde alcançou esta busca de bibliografia, não

foram identificados, por exemplo, estudos brasileiros envolvendo análises de ciclo de vida específicas de edificações históricas, objeto de interesse do trabalho em tela. Faz-se exceção apenas ao trabalho de Sattler, Kuhn e Souza (2009), que realizaram o inventário da energia incorporada em alguns sistemas construtivos tradicionais, como alvenaria de pedra e enxaimel.

2.3 ESTUDOS SOBRE A VIABILIDADE AMBIENTAL DA REABILITAÇÃO

*No historic building should be pulled
down until every effort has been
made to find a beneficial use by
rehabilitation
(FEILDEN, 2003).*

Os primeiros trabalhos sobre a viabilidade ambiental da reabilitação de edifícios existentes vs. nova construção remontam ao final da década de 1970. Naquele ano, o *Advisory Council on Historic Preservation* (ACHP - agência federal responsável pelo aconselhamento ao Presidente e ao Congresso estadunidense sobre a política nacional de preservação do patrimônio) divulgou nos EUA o estudo *Assessing the energy conservation benefits of historic preservation* (ACHP, 1979). Os itens a seguir analisam este trabalho e estendem-se até realizações mais recentes, que englobam conceitos de análise de ciclo de vida.

2.3.1 Primórdios: energia incorporada e energia de operação

Utilizando uma abordagem semelhante a uma análise de ciclo de vida energético, o ACHP estudou ferramentas para avaliar o potencial de conservação de energia através da reabilitação de edificações (ACHP, 1979). O ACHP propôs um método para quantificar a energia necessária para restaurar e reabilitar edifícios existentes ou, alternativamente, para demoli-los e substituí-los por novas construções. O método possibilita quantificar: 1) a energia incorporada nos materiais e na construção do edifício existente; 2) a energia investida nos materiais e nas obras necessárias para reabilitar o edifício vs. a energia demandada na sua substituição por nova edificação; 3) a energia anual de operação, tanto do edifício existente quanto da nova construção. A alternativa da substituição

do edifício existente considera a energia requerida na sua demolição, mais a energia incorporada nos materiais e na construção da nova edificação. A alternativa da reabilitação considera a energia incorporada nas demolições parciais e nos materiais e intervenções de reabilitação. Adicionando-se, em cada uma das alternativas, a energia incorporada nos materiais e construção à energia requerida para a operação dos edifícios, tem-se o total de energia investido. Da diferença entre os totais, pode-se calcular a energia economizada com a reabilitação. O método possuía três níveis de aplicação, diferentes em acuracidade. O mais simples partia da estimativa da energia incorporada nas edificações com base em um valor médio por área construída. O mais complexo envolvia um cálculo mais preciso dos quantitativos dos principais materiais, multiplicados por sua respectiva energia incorporada. Os dados de energia incorporada provinham de um levantamento realizado em meados da década de 1970, com dados de construções típicas dos EUA à época (ENERGY RESOURCE GROUP OF THE CENTER FOR ADVANCED COMPUTATION AT THE UNIVERSITY OF ILLINOIS AT URBANA-CHAMPAIGN; RICHARD G. STEIN & ASSOCIATES, 1976). A energia necessária para a operação era estimada a partir de cálculos simplificados ou simulação computacional estática.

O ACHP exemplificou a aplicação do método em três estudos de caso comparando edificações históricas existentes com novas construções hipotéticas. A unidade funcional utilizada foi a área construída total das edificações. Os resultados finais foram expressos em termos de energia total requerida para a reabilitação ou para a nova construção. Também foi calculado o tempo necessário para a nova construção amortizar o investimento em energia quando comparada à opção da reabilitação.

O primeiro dos exemplos apresentados trata da reabilitação do conjunto de apartamentos *Lockefield Garden* (Figura 2.8), conjunto habitacional de baixa renda construído em 1921 em Indianápolis, Indiana, EUA. Então abandonado, o complexo teve sua energia incorporada nos materiais e construção comparada a 17 milhões de litros de gasolina. Em relação à construção de uma edificação nova e similar, representaria uma economia de energia incorporada em materiais e obra da ordem de 241.502,28 GJ. Mesmo o edifício

antigo consumindo 4.853,25 GJ a mais de energia ao ano para sua operação, a nova edificação levaria mais de 50 anos para recuperar a energia investida em materiais e construção.



Figura 2.8 – Conjunto *Lockefield Garden*, Indiana, EUA.

Fonte: www.woodhavenhistoric.com, acessado em 06/02/2012.

Em outro exemplo apresentado pelo ACHP, a construção de um novo edifício de escritórios e salas comerciais levaria cerca de 250 anos para recuperar os investimentos em energia se comparada com a adaptação do antigo hotel *Grand Central Arcade* (Figura 2.9), de Seattle, para o mesmo uso. Isto porque foi estimado um déficit bastante pequeno no consumo de energia para operação do edifício reabilitado em relação ao novo. A reabilitação do antigo hotel representaria a economia de 2,6 milhões de litros de gasolina. Por outro lado, em um terceiro exemplo, o investimento em energia para a conversão em 3 unidades de moradia de um antigo pavilhão garagem na área histórica do Capitólio, Washington, DC, considerando apenas o aproveitamento do envoltório, seria recuperado em menos tempo, 10 anos.



Figura 2.9 – Edifício *Grand Central Arcade*, em Seattle, EUA.

Fonte: www.makensay.comretail.html, acessado em 06/02/2012.

O estudo realizado pelo ACHP fora baseado em cálculos simplificados sobre o consumo de energia para operação e em estimativas aproximadas da energia incorporada nos materiais e nas atividades de construção. Todavia, apresentou algumas conclusões interessantes sobre a reutilização de edifícios existentes. Primeiro: o uso que será dado à edificação reabilitada importa, e muito. A envergadura da obra necessária para a adaptação da edificação para um uso diverso do original pode exigir uma quantidade maior ou menor de materiais, influenciando no investimento em energia incorporada. Essa observação resulta da grande diferença apresentada nos resultados para o *Grand Central Arcade* e para a antiga garagem no Capitólio: no primeiro, o uso original foi mantido, enquanto no segundo, não. Por fim, a tipologia arquitetônica e a técnica construtiva também alteram bastante os resultados, posto que padrões distintos de envoltório leva a consumos diferentes de energia para operação. O pequeno percentual de abertura nas fachadas e a espessura e composição das paredes do *Lockefield Garden* e do *Grand Central Arcade* colocaram-

nos em vantagem quando comparadas com a prática construtiva da época do trabalho do ACHP.

Em *Assessing the energy conservation benefits of historic preservation* (ACHP, 1979), o ACHP adotou a premissa de que a reabilitação conservaria energia, ao prolongar o uso da energia incorporada em edifícios existentes e evitar o dispêndio de energia em novas construções. O conceito difundiu-se e foi amplamente utilizado pelos defensores da preservação do patrimônio edificado. Argumentou-se que os edifícios históricos seriam muito intensivos em energia incorporada por área construída, visto que, de forma geral, apresentam pé-direito elevado e paredes espessas, quase sempre maciças. Demoli-los significaria desperdiçar essa energia (JACKSON, 2005). Por outro lado, os materiais de construção utilizados em novas edificações também são muito intensivos em energia incorporada, isto é, consomem muita energia para sua fabricação e instalação na obra (RENPING; ZHENYU, 2006). Tanto num caso como no outro, um eventual melhor desempenho térmico – e, conseqüentemente, menor consumo de energia para operação – das novas construções não compensaria a energia investida em sua construção.

Essa atenção, por assim dizer, exclusiva para com as questões de energia, surgiu no final dos anos 1970, quando o mundo tinha recém saído de duas grandes crises energéticas. Após o Protocolo de Kyoto (ONU, 1998), as preocupações com as mudanças climáticas e com as emissões de gases causadores do efeito estufa pelas edificações ganharam relevância. Assim, paralelamente aos estudos sobre energia incorporada – pode-se citar ainda Tucker, Treloar e CSIRO (1994 *apud* ITARD e KLUNDER, 2007) – pesquisas sobre emissões de CO₂ pelo setor edificado e o conceito de CO₂ incorporado nas edificações também avançaram no meio científico.

2.3.2 Emissões de CO₂ relacionadas à energia

A *Empty Homes Agency* da Inglaterra estimou as emissões de CO₂ envolvidas na reutilização de edificações antigas em comparação com a construção de novas moradias (EHA, 2008). No trabalho, foi calculado o CO₂ emitido na fabricação e transporte dos materiais e componentes utilizados em obras de reabilitação e na construção de

novas edificações (o CO₂ incorporado, expresso em kg de CO₂). Também projetou o CO₂ emitido na operação dessas edificações ao longo de 50 anos (o CO₂ de operação). A análise do fluxo de CO₂ ao longo dessas diferentes fases é tratada como análise de ciclo de vida de carbono. A concepção da análise de ciclo de vida de carbono é comparável à da análise de ciclo de vida energético. No caso de estudos como o da *Empty Homes Agency*, a analogia é imediata, visto que o CO₂ emitido considerado deve-se ao uso direto ou indireto de energia. Entretanto, não se trata de uma simples conversão de MJ em kg de CO₂: um componente construtivo que utiliza grande quantidade de energia em sua fabricação, porém de fonte renovável, pode ter muita energia e pouco CO₂ incorporados (EHA, 2008; MENZIES, 2011; STURGIS; ROBERTS, 2010).

A *Empty Homes Agency* comparou, par a par, a reabilitação real de três residências existentes com outras três edificações recém-construídas. A agência se encarrega de trabalhos relacionados à ocupação de edificações vazias para suprir o déficit habitacional na Inglaterra, seu trabalho não tem ênfase em edificações históricas. Não obstante, as edificações reabilitadas datavam de 1890, 1895 e primeira metade século XIX (parte dos 39% do parque edilício do Reino Unido, que fora construído antes da II Guerra Mundial). As reabilitações realizadas envolveram, além de melhorias no desempenho térmico do envoltório, a completa substituição das instalações hidrossanitárias e elétricas nas três residências. Também foi substituído o telhado em uma delas e construídas ampliações em outras duas. O CO₂ incorporado foi calculado a partir da base de dados *Inventory of Carbon and Energy* – ICE (HAMMOND; JONES, 2011). As projeções de emissões anuais de CO₂ de operação foram feitas utilizando o método do *National Energy Home Rating* (NES, 2012). A Figura 2.10 apresenta as emissões acumuladas ao longo de 50 anos para as seis edificações, onde as linhas cheias representam as edificações reabilitadas e, as tracejadas, as novas construções. Analisando o perfil das emissões ao longo do ciclo de vida esperado para as edificações, depreende-se que uma alta intensidade de CO₂ incorporado em medidas de eficiência energética pode, teoricamente, ser justificada, desde que resulte em uma edificação com baixas emissões de operação (EHA, 2008). Cabe, neste caso, o mesmo exemplo das camadas de isolamento térmico citado no item 2.2.

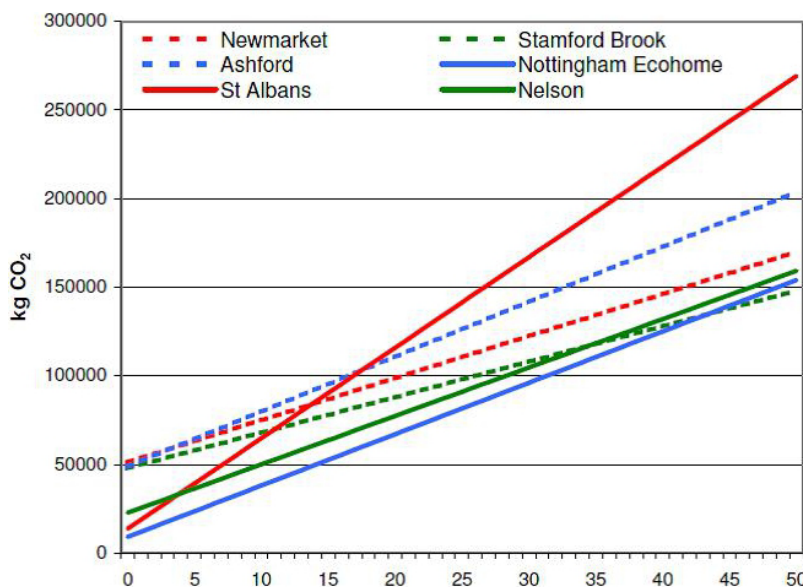


Figura 2.10 – Emissões acumuladas de CO₂ ao longo de 50 anos em residências na Inglaterra.

Fonte: Adaptado de EHA (2008).

Os cálculos demonstraram que a reutilização de edificações antigas poderia significar uma “economia” inicial de 35 tCO₂ por residência. Esse saldo se deve à diferença entre a quantidade de energia e materiais necessários para construção de toda uma nova edificação em comparação com a reabilitação. Entretanto, ao final de 50 anos, a diferença nas emissões totais (CO₂ incorporado + CO₂ de operação) não resultou muito significativa (Figura 2.11). Por outro lado, a implantação de medidas de eficiência energética superdimensionadas poderia levar a investimentos excessivos de recursos e desperdício de carbono incorporado. Isto é, poder-se-ia emitir mais carbono na reabilitação do que aquele que será “economizado” na operação da edificação (ROLFSMAN, 2002). Estudos como estes demonstram a importância de se analisar, simultaneamente, as emissões incorporadas e as emissões de operação em uma reabilitação (STURGIS; ROBERTS, 2010).

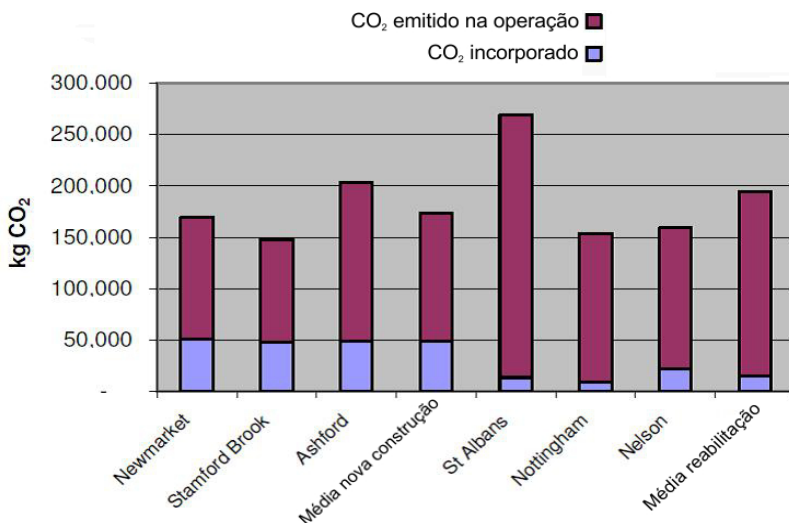


Figura 2.11 – Emissões totais de CO₂ ao final de 50 anos em residências na Inglaterra.

Fonte: Adaptado de (EHA, 2008).

Depois do trabalho sobre energia incorporada realizado pelo *Advisory Council on Historic Preservation* (ACHP, 1979), outro estudo comparando as hipóteses de reabilitação de edificações existentes ou de nova construção foi realizado para o *Parks Canada*. Nesse caso, houve ênfase específica em edifícios de valor cultural (o *Parks Canada* é a agência governamental encarregada da preservação e valorização do patrimônio natural e cultural canadense). Apresentado por *Athena Institute e Morrison Hershfield Limited* (2009) e *Lucuik et al.* (2010), o estudo analisa as repercussões ambientais envolvidas na reabilitação de quatro edifícios históricos em diferentes regiões do Canadá (Ottawa, Winnipeg, Calgary e Vancouver). A intervenção nos edifícios históricos contemplou também a implantação de melhorias de eficiência energética. As novas construções hipotéticas utilizadas na comparação com os edifícios existentes eram idênticas a estes em área construída, projeção e número de pavimentos. Devendo representar tipos arquitetônicos típicos, seus materiais e componentes foram escolhidos em função da prática construtiva local. As novas edificações deveriam também atender aos

requerimentos do *Model National Energy Code for Buildings* (MNECB). Esse regulamento, de natureza prescritiva, estabelece as medidas de eficiência energética que devem constar em novas construções. As repercussões ambientais para os principais componentes construtivos das duas alternativas foram calculadas por meio das ferramentas desenvolvidas pelo *Athena Sustainable Materials Institute* (2012), o *EcoCalculator* e o *Impact Estimator*. Foram considerados os efeitos relacionados à extração de recursos, transformação de matéria-prima, transporte, construção, manutenção, substituição e destinação final. O uso de energia para operação, tanto das novas construções quanto dos edifícios históricos, foi predito com a ferramenta desenvolvida para o *Canadian Building Incentive Program* (CBIP). Na avaliação, estipulou-se uma vida útil de 60 anos para os edifícios. Para cada edificação, quatro cenários foram avaliados: reabilitação de base e a opção de reabilitação de melhor desempenho, para os edifícios existentes; edificação típica e edifício de alto desempenho, para as novas construções. Todavia, o impacto ambiental da implantação das medidas de eficiência energética não foi incluído no escopo da análise de ciclo de vida. O consumo dos edifícios existentes foi confrontado com faturas de consumo de energia para calibrar os modelos avaliados antes da adoção das medidas de eficiência energética. Entretanto, os autores alertam que as limitações da ferramenta do CBIP podem levar a variações significativas de resultado, sugerindo a utilização de simulação computacional para uma maior acuracidade na avaliação.

A quantificação do impacto ambiental evitado (em termos de uso de energia primária e de potencial de aquecimento global) pela reabilitação das quatro edificações canadenses é apresentada na Tabela 2.3. As emissões de CO₂ evitadas também foram comparadas com o uso de energia por um número equivalente de domicílios típicos no Canadá. Os autores (ATHENA SUSTAINABLE MATERIALS INSTITUTE; MORRISON HERSHFIELD LIMITED, 2009; LUCIUK; TRUSTY; HUFFMAN; PREFASI, 2010) não encontraram diferenças significativas entre o consumo de energia para operação das edificações existentes e das novas construções – considerando que as edificações antigas sejam adequadamente reabilitadas. Assim, os resultados expressam os impactos ambientais que deixam de ser provocados com a simples opção pela reutilização de uma edificação

em vez da construção de outra equivalente. Isto é, os dados refletem diretamente a diferença entre os efeitos incorporados em cada uma das opções.

Tabela 2.3 – Consumo de energia primária e potencial de aquecimento global evitado pela reabilitação de quatro edificações no Canadá

Edifício	Consumo de Energia Primária evitado (MJ)	Potencial de aquecimento global evitado (tCO ₂ -eq)	Equivalente às emissões anuais de CO ₂ relacionadas ao uso de energia
Parkdale Fire Station (Ottawa)	2.616.165	184,76	de 85,2 residências
Birks Building (Winnipeg)	27.913.070	1.561,60	de 473 residências
Lougheed Building (Calgary)	43.093.628	3.449,00	de 1.591 residências
Chinese Freemasons Building (Vancouver)	6.970.013	484,48	de 224 residências

Fonte: Adaptado de Athena Institute e Morrison Hershfield Limited (2009).

Sturgis e Roberts (2010), entretanto, alertam para algumas limitações que devem ser levadas em conta nas análises que contabilizam os efeitos ambientais incorporados em edificações e prognosticam os efeitos futuros. Segundo os autores, estes tipos de estudo, de forma geral, não consideram as diferentes durabilidades dos materiais e componentes de construção, definindo um prazo único de substituição ou reposição. Também não diferenciam a vida útil teórica da vida útil real: na prática, a vida útil de um bem ou produto nada mais é que o tempo durante o qual se utiliza ou se pretende utilizar esse bem. Ademais, frequentemente assume-se que as definições de projeto tomadas no momento inicial da reabilitação ou construção da edificação não sofrerão alterações ao longo de sua vida útil. Fawcett e Mayne (2012) apontam ainda que a maioria dos estudos sobre “eco-renovação” – empregando aqui o termo utilizado pelos autores – contempla a intervenção na edificação em um evento único. Ou seja, envolveriam somente uma grande obra, enquanto intervenções sequenciadas, ao longo de

vários anos, poderiam ser mais adequadas (FAWCETT; MAYNE, 2012).

Isto posto, Sturgis e Roberts (2010) propuseram um método para traçar o perfil das emissões de carbono pelas edificações e seus componentes ao longo do tempo. O trabalho se diferencia por considerar, simultaneamente e em uma mesma unidade de medida, o carbono incorporado e aquele emitido durante a operação do edifício. Este último é usualmente expresso em uma base temporal. Para o primeiro, os autores também propõem uma estratificação anual, a partir de uma divisão *pro rata* do carbono incorporado em cada componente por sua durabilidade. No caso de sistemas compostos por diferentes componentes, prevalece sempre a vida de serviço esperada para aquele de menor durabilidade. O somatório dos totais anuais de carbono incorporado de todos os componentes e sistemas de uma edificação, dividido por sua área útil, resulta em um índice medido em $\text{kgCO}_2/\text{m}^2/\text{ano}$: a ECE (do inglês *Embodied Carbon Efficiency*, eficiência em carbono incorporado). O método pode ser aplicado como apoio à decisão em projetos de reabilitação ou para comparar a reabilitação de um edifício existente com uma nova construção. Nesses casos, a demolição de um edifício ou a substituição de componentes construtivos que ainda apresentam desempenho satisfatório resultaria em um passivo ambiental. Esse passivo corresponde ao seu valor residual da edificação ou componente demolido, isto é, à vida útil remanescente. Portanto, deve ser considerado na análise da eficiência em carbono do empreendimento como um todo, “creditando” ou “subtraindo” carbono da edificação nova ou reabilitada. O método também possibilita quantificar, individualmente e ao longo do tempo, as cargas de cada componente ou sistema de uma edificação nas emissões totais de carbono. Permite diferenciar, por exemplo, no caso de um edifício comercial, o *core*, a área privativa e o envoltório. Atribuem-se, desta forma, a quem de direito (proprietários, locatários, condomínio etc.), eventuais benefícios ou responsabilidades de ações que melhorem ou piorem a “eficiência em carbono” da edificação. Sturgis e Roberts utilizam dados de carbono incorporados do já citado ICE (HAMMOND; JONES, 2011).

As análises de ciclo de vida de carbono baseadas em inventários como o ICE consideram inclusive os chamados efeitos pré-

combustão das emissões de CO₂ relacionadas à energia. Os efeitos pré-combustão são aqueles relacionados aos processos de produção de energia e sua conversão em fontes utilizáveis. Em algumas pesquisas chega-se ainda a fazer o balanço entre a emissão e absorção de CO₂ decorrentes, respectivamente, das reações de calcinação e carbonatação do concreto utilizado nas edificações. A primeira é devida à produção do cimento empregado na produção do concreto, enquanto a segunda se dá durante o envelhecimento natural da estrutura. Chau *et al.* (2012) afirmam que as reações de carbonatação em uma estrutura em concreto de uma edificação chegam a absorver, aproximadamente, 17% do CO₂ emitido pelo processo de calcinação. Os cálculos consideraram uma vida útil de 60 anos para a estrutura, e foram baseados em dados de pesquisa de Doodoo, Gustavsson e Sathre (2009). Ainda segundo Chau *et al.*, a reutilização da superestrutura (vigas e pilares) de um edifício existente pode reduzir o CO₂ incorporado no edifício reabilitado em 22,8 kgCO₂/m². Isto representa 10,6% do total da edificação nos cálculos dos autores.

Por outro lado, alguns autores afirmam que avaliações do ciclo de vida de carbono de edificações são pouco mais que estudos de energia incorporada, ou simples agregações de dados de inventários de ciclo de vida (TRUSTY, 2006, 2010). Afinal, os problemas ambientais vão bem além do uso de energia e das emissões de CO₂ correlatas. Para Trusty (2006, 2010), o que realmente interessa são as repercussões ambientais finais – no caso, o potencial de aquecimento global. Além disso, a construção e operação de edificações envolvem várias outras perturbações ao meio ambiente. O lançamento de resíduos e substâncias tóxicas no ar, água e solo; a depleção de recursos; o uso de solo e consequente diminuição de áreas de hábitat são alguns dos problemas que podem ser citados. A análise dos impactos ambientais finais pode levar a conclusões bem diferentes daquelas obtidas em estudos de energia ou carbono (ITARD; KLUNDER, 2007). Por exemplo, a madeira tem pouca energia incorporada. Mas, se considerados na análise de ciclo de vida, os danos ao meio ambiente provocados pelos desmatamentos devido ao uso da madeira nas construções podem não ser desprezíveis. Os impactos ambientais finais podem fornecer um cenário de avaliação mais completo nas análises de ciclo de vida (LUCUIK; TRUSTY; HUFFMAN; PREFASI, 2010).

2.3.3 O estado-da-arte: análise de ciclo de vida ambiental

Trusty (2004) foi um pouco além da contabilização da energia e do CO₂ incorporados e de operação. O autor comparou as repercussões ambientais envolvidas na reabilitação de edifícios existentes vs nova construção em dois estudos de caso: conversão do edifício de uma antiga fábrica de locomotivas de Montreal em um edifício de escritórios; e na requalificação de todo um quarteirão em Winnipeg. As duas situações foram confrontadas com a alternativa de demolição e construção de uma única edificação de referência – inclusive no caso do quarteirão –, de área equivalente, no mesmo local. Trusty (2004) utilizou como indicadores, além da energia incorporada, a emissão de gases do efeito estufa (expresso em termos de Potencial de Aquecimento Global – GWP, em tCO₂-eq) e o lançamento de gases causadores da chuva ácida (SO₂, NO₂, NO, NH₃, HF e HCl, expressos como Potencial de Acidificação, em tSO₂-eq).

Embora o próprio autor questione os resultados obtidos nas comparações, o estudo traz à tona questões metodológicas importantes. Nas análises, foi utilizada a abordagem de impacto ambiental evitado. Este é caracterizado pelos efeitos ambientais relacionados à construção do edifício de referência, os quais seriam evitados com a preservação da edificação original. No caso da edificação de Montreal, o impacto ambiental evitado foi “creditado” nas repercussões ambientais da reabilitação do edifício existente. Ou seja, a reabilitação do edifício existente resultaria na “emissão” de uma quantidade negativa de 448 tCO₂-eq, enquanto a construção do edifício de referência emitiria 1.007 tCO₂-eq. Já para o complexo de Winnipeg, o bônus da reutilização das estruturas existentes foi considerado de forma diferente. A área construída preservada foi contabilizada na área total do empreendimento reabilitado. Ou seja, não foi alocada nenhuma carga ambiental para os elementos preservados. Nesse caso, a ordem de grandeza do potencial de aquecimento global se inverteu: o quarteirão reabilitado resultaria na emissão de 4.585 tCO₂-eq, contra 2.588 tCO₂-eq da edificação de referência. Entretanto, a comparação de todo um conjunto de edificações existentes – o quarteirão em Winnipeg – com a hipótese de apenas uma edificação de referência é questionável. Embora a área construída do quarteirão de edifícios e da edificação única que os substituiria seja equivalente, o índice de compacidade dessa

última é, sem dúvida, maior, incorrendo na problemática já tratada no item 2.2.3.

Para além do potencial de aquecimento global, quando consideradas outras categorias de impacto ambiental, a reabilitação pode se mostrar uma alternativa ainda mais interessante que a construção de novas edificações. Itard e Klunder (2007) avaliaram os efeitos ambientais potenciais de diferentes possibilidades de intervenção em dois conjuntos residenciais na Holanda, chamados Morgenstond e Poptahof. Construíram quatro cenários:

- 1) Manutenção, conservando os edifícios sem quaisquer alterações, realizando apenas manutenções rotineiras;
- 2) Consolidação, cenário no qual os edifícios são preservados, mas recebem melhorias no isolamento térmico. É adicionado poliestireno expandido às paredes externas, pisos e cobertura, de forma a aumentar a resistência térmica de 1,25 para 2,50 m²K/W. As janelas são substituídas por outras com transmitância térmica de no máximo 2,00 W/m²K;
- 3) Transformação, onde outras medidas de eficiência energética são adotadas e os edifícios têm sua concepção espacial alterada para se adequar às demandas contemporâneas; e por fim,
- 4) Demolição e construção de nova edificação de acordo com práticas construtivas mais atuais.

Itard e Klunder (2007) utilizaram o *EcoQuantum* (SEV; SBR, 2002) para estimar os efeitos ambientais envolvidos no uso de materiais, água e energia e na geração de resíduos de demolição (a reciclagem de materiais não foi considerada). O *EcoQuantum* compreende uma base de dados para inventários de ciclo de vida específica para a Holanda. O uso de energia de operação foi calculado de acordo com o regulamento de eficiência energética holandês, englobando o uso de energia para calefação, ventilação e aquecimento de água. O consumo de água e de eletricidade foi determinado segundo valores de norma. O método de avaliação de impacto de ciclo de vida empregado foi o CML-2 (GOEDKOOOP; OELE; SCHRYVER; VIEIRA; *et al.*, 2010). Para cada um dos quatro cenários, foram levantados os impactos ambientais potenciais nas seguintes categorias: depleção

de recursos abióticos (ADP); aquecimento global (GWP); depleção da camada de ozônio (ODP); formação de foto-oxidantes (POCP); toxicidade humana (HTP); ecotoxicidade de sedimentos (SETP); ecotoxicidade aquática (AETP); ecotoxicidade terrestre (TETP); acidificação (AP); e eutrofização (EP).

Dos gráficos apresentados nas Figuras 2.12 e 2.13, nos quais o cenário de manutenção representa o caso base (100%), depreende-se que nos dois estudos a transformação – aqui considerada como reabilitação – apresenta vantagens ambientais em relação à nova construção. No estudo com o conjunto de Poptahof, o cenário de nova construção apresentou o pior desempenho ambiental. Perdeu, inclusive, para a simples manutenção da edificação, ou seja, a ausência de qualquer intervenção.

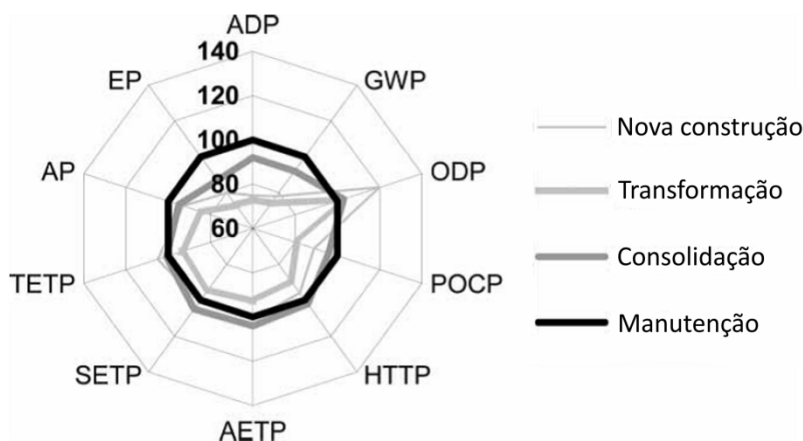


Figura 2.12 – Impactos ambientais potenciais, em %, para o conjunto residencial Morgenstond, Holanda.

Fonte: Adaptado de Itard e Klunder (2007).

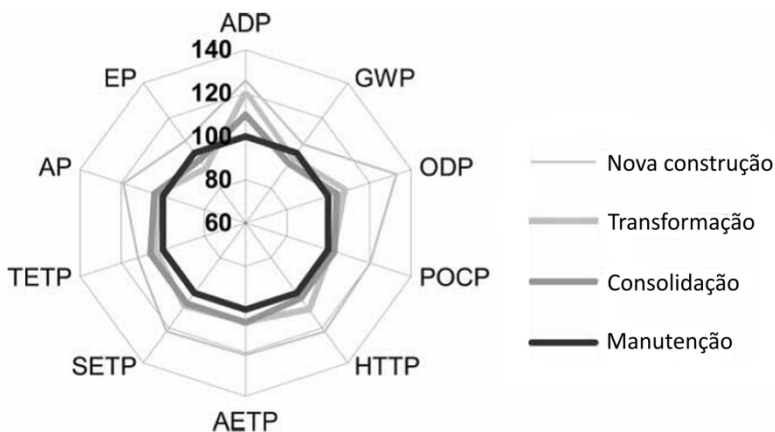


Figura 2.13 – Impactos ambientais potenciais, em %, para o conjunto residencial Poptahof, Holanda.

Fonte: Adaptado de Itard e Klunder (2007).

Os autores consideraram na análise uma vida útil de 50 anos contados a partir da intervenção (consolidação ou transformação) ou reconstrução dos edifícios. Todavia, contabilizaram os efeitos acumulados desde a data original de construção dos edifícios. Os autores consideraram, no cenário de transformação, também as obras necessárias para readequar às edificações aos padrões de uso contemporâneos, inclusive no que diz respeito aos interesses do mercado imobiliário. Normalmente, encontram-se na literatura estudos interessados apenas nas intervenções relacionadas às medidas de eficiência energética.

O *National Trust for Historic Preservation* foi mais uma instituição vinculada à preservação do patrimônio edificado a utilizar conceitos de análise de ciclo de vida para demonstrar os méritos ambientais da reabilitação arquitetônica. Dos trabalhos tratados até aqui, *The Greenest Building: Quantifying the environmental value of building reuse* (NTHP, 2012) foi o que seguiu mais regimento os preceitos da análise de ciclo de vida tal qual definidos na ISO 14040 (ABNT, 2009b). O *National Trust* examinou a viabilidade ambiental da reabilitação de diversos tipos de edificações em seis cidades americanas, representando diferentes zonas climáticas. Os tipos considerados foram: edifício residencial unifamiliar, edifício

residencial multifamiliar, edifício de escritórios, sobrado de uso misto, edifício escolar e armazém urbano convertido em escritório ou residencial multifamiliar. A reabilitação de cada um dos tipos foi comparada com edificações recém-construídas – ou com projeto elaborado e materiais quantificados –, equivalentes em tamanho e função. Foram analisados dois cenários: um caso base, onde a nova edificação apresenta um desempenho médio; e outro avançado, no qual a nova edificação é considerada 30% mais eficiente que no caso base. A abordagem utilizada foi a do impacto evitado pela reabilitação em quatro categorias de danos ambientais, expresso em termos percentuais das repercussões ambientais atribuídas à nova construção:

- Mudanças climáticas;
- Saúde humana;
- Qualidade dos ecossistemas e;
- Depleção de recursos.

A vida útil das edificações considerada no ciclo de vida foi de 75 anos e a unidade funcional, em unidade de área (pé quadrado). O desempenho termoenergético, tanto das edificações novas quanto das reabilitadas, foi considerado equivalente e tomado a partir de pesquisas de eficiência energética de edificações e dados médios nacionais.

De acordo com o estudo, em comparação com a reutilização de edifícios existentes, mesmo edificações novas e de alto desempenho (30% mais eficientes que a média), na categoria mudanças climáticas, podem levar até oitenta anos para amortizar a diferença dos impactos das respectivas obras. A Tabela 2.4 expressa o tempo de amortização para aquela categoria de impacto, chamado de período de equivalência de carbono, para cada um dos tipos em duas das cidades analisadas. O armazém convertido em residencial multifamiliar foi o único tipo em que, nesse quesito, o desempenho ambiental da nova construção foi superior ao da reabilitação.

Tabela 2.4 – Anos de equivalência de carbono para reutilização de edifícios existentes vs nova construção

Tipo de edifício	Chicago	Portland
Sobrado de uso misto	42 anos	80 anos
Residencial unifamiliar	38 anos	50 anos
Comercial/escritórios	25 anos	42 anos
Armazém convertido em comercial	12 anos	19 anos
Residencial multifamiliar	16 anos	20 anos
Escolar	10 anos	16 anos
Armazém convertido em residencial	–	–

Fonte: Adaptado de *National Trust for Historic Preservation* (2012).

Nas outras categorias de impacto, na maioria das situações analisadas a reutilização dos edifícios existentes apresentou vantagens ambientais em relação à nova construção. A exceção ficou, de fato, por conta da conversão de armazém em residencial multifamiliar. Este, em comparação com a construção de um novo edifício, acarretaria impactos ambientais 1% maiores na categoria de impacto na qualidade dos ecossistemas; e 6% na categoria de impacto na saúde humana. Dentre os tipos de edificações estudados pelo *National Trust*, o armazém é a que demanda maiores intervenções para sua reabilitação; portanto, maior quantidade de material. Essa constatação demonstra o peso da quantidade dos materiais utilizados na obra de reabilitação. Assim, no caso de a reabilitação envolver alteração de uso, deve-se procurar destinar ao edifício um uso o mais compatível possível com sua configuração original. Para o edifício de escritórios, foi realizada uma análise de sensibilidade quanto aos materiais utilizados nas melhorias visando maior eficiência energética. Os impactos negativos à qualidade dos ecossistemas superaram as vantagens em termos de economia de energia para operação. Ou seja: não só a quantidade de materiais tem um peso significativo no ciclo de vida das edificações, como também é importante escolher com cuidado os tipos de materiais empregados.

De forma geral, os trabalhos até aqui apresentados trataram das melhorias no desempenho das edificações – implantadas no momento da reabilitação – como um pacote de medidas estabelecidas previamente. Sua eficácia, isto é, a redução obtida no consumo de energia para operação da edificação, é avaliada em um processo à parte, no qual a combinação de medidas mais energeticamente eficiente é selecionada. O resultado, posteriormente, é incluído no escopo da análise de ciclo de vida, representando os efeitos de operação da edificação. Desta feita, dentre as diversas alternativas de projeto, acaba-se por selecionar a opção de melhor desempenho energético, mas, que pode não ser a de melhor desempenho ambiental. Embora o consumo de energia seja o impacto mais importante no estágio operacional do ciclo de vida das edificações, como já foi dito, aquilo que “não é significativo em um simples edifício pode ser de grande significância na esfera local ou regional” (KHASREEN; BANFILL; MENZIES, 2009).

Dada a magnitude do impacto do uso de energia na operação das edificações, o resultado final na macroescala – a decisão entre reabilitar ou demolir –, provavelmente não seria alterado ao se optar por essa ou aquela medida de eficiência energética. Agora, a partir do momento em que se define pela preservação da edificação, pode ser interessante lançar mão da análise de ciclo de vida também na microescala, ou seja, na escolha entre diferentes alternativas de reabilitação. Assim como análises de ciclo de vida podem ser utilizadas para avaliar a viabilidade ambiental da reabilitação de edifícios existentes face à construção de novas edificações, a metodologia pode ser empregada também na reabilitação em si. Nesse caso, diferentes alternativas de projeto são comparadas, e a solução de melhor desempenho pode ser identificada com base nos resultados da análise de ciclo de vida. Desta forma, aperfeiçoa-se o efeito global da reabilitação.

Procedimentos baseados em uma abordagem de ciclo de vida para selecionar a opção de reabilitação de melhor desempenho foram destacados por Ardente *et al.* (2011) e Iyer-Raniga e Wong (2012). Iyer-Raniga e Wong (2012), inclusive, comparam as propostas de reabilitação de edifícios valor cultural com o desempenho ambiental de uma edificação de padrão de construção atual na Austrália. O estudo é interessante ao conjugar uma ferramenta de simulação

termoenergética de edificações, o *AccuRate*, a um programa computacional de análise de ciclo de vida, o *SimaPro*, operando em um processo iterativo. O consumo de energia durante a fase de operação ainda é de grande relevo no ciclo de vida das edificações. A correta predição desse consumo é fundamental na diminuição das incertezas da análise de ciclo de vida e no apoio à tomada de decisão em projeto. Utilizando-se ferramentas computacionais de simulação termoenergética de edificações, podem-se conseguir estimativas de consumo de energia com boa dose de confiabilidade.

2.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL NA REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS HISTÓRICOS

*La simulation permet aussi d'évaluer
des projets qui ne seront jamais
effectués (...). En effet, la simulation
permet de montrer l'effet désastreux
de certains projets avant et parfois
sans que le désastre n'ait à se
produire
(VAN DER MAREN, 2003).*

O procedimento da simulação computacional baseia-se na reprodução de processos dinâmicos a partir da construção de um modelo virtual relacionado a parâmetros e variáveis de seu correspondente real – um edifício existente ou em projeto, por exemplo. O objetivo é analisar aqueles processos e antecipar eventuais consequências (SEMLALI, 2009).

O modelo e os processos simulados são sempre representações simplificadas do real e, grosso modo, a complexidade das variáveis envolvidas pressupõe que seja assumido determinado grau de incertezas (TAYLOR; BLADES; CASSAR; RIDLEY, 2005). Daí decorre que “a simulação é muito mais eficaz para comparar o desempenho predito de alternativas de projeto que para prognosticar o desempenho de uma única solução” (HENSEN; DJUNAEDY; RADOŠEVIĆ; YAHIAOUI, 2004). Isso faz da simulação computacional uma ferramenta bastante adequada à avaliação e apoio à tomada de decisão em projetos de reabilitação de edificações. Nesta aplicação, diversos cenários são simulados para comparar as implicações de

diferentes melhorias que podem ser propostas para edifícios existentes (CLUVER; RANDALL, 2010).

As ferramentas de simulação termoenergética de edificações podem disponibilizar uma série de informações preditivas sobre a operação de um edifício existente ou em fase de projeto, antes mesmo de sua construção (MENDES; WESTPHAL; LAMBERTS; CUNHA NETO, 2008). Dados como a demanda e consumo de energia, umidade e temperaturas internas, aproveitamento da iluminação natural, entre outros, podem ser obtidos em base horária, para um ano climático característico.

2.4.1 Ferramentas de simulação computacional de edificações e aplicações

Existem diversos pacotes validados e reconhecidos para simulação do ambiente luminoso, da ventilação natural, da qualidade do ar interno, da carga térmica e análise energética, entre outros. O Departamento de Energia dos Estados Unidos mantém em seu sítio na internet um diretório, constantemente atualizado, de programas computacionais para simulação e avaliação de edificações (DOE, 2011).

Para Judkoff e Neymark (2006), os programas de simulação termoenergética devem ser capazes de contemplar todos os aspectos das edificações que influenciam no seu consumo de energia e no conforto térmico e visual de seus ocupantes. Visando normatizar a acuracidade dos diversos pacotes computacionais de simulação disponíveis, o *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) do Departamento de Energia dos Estados Unidos desenvolveu um protocolo de avaliação e validação dos programas. O método foi compilado na norma *ANSI/ASHRAE Standard 140 – Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs* (ANSI/ASHRAE, 2004). O enquadramento do programa de simulação na *ANSI/ASHRAE Standard 140* é exigido, por exemplo, pelo sistema brasileiro de etiquetagem do nível de eficiência energética de edificações (MDIC/INMETRO, 2010).

A propósito disso, as simulações termoenergéticas têm sido cada vez mais exigidas por regulamentos de eficiência energética ou

sistemas de certificação ambiental para avaliar e classificar o desempenho de edificações. Barnham, Heath e Pearson (2008) apontam para a tendência de que ferramentas de simulação desenvolvidas especificamente para esses regulamentos tornem-se comuns. No Brasil, o Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina (LabEEE/UFSC) desenvolveu um simulador para apoiar projetistas no processo de obtenção da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia: o S3E, disponibilizado *online* (LABEEE/UFSC, 2011). Entretanto, Barnham, Heath e Pearson (2008) alertam para a importância de adequar esse tipo de ferramenta às particularidades construtivas de edificações mais antigas, que formam boa parte do parque edilício atual. Os autores analisaram quatro diferentes ferramentas de avaliação de desempenho vinculadas aos regulamentos de eficiência energética em edificações da Escócia. Identificaram que os sistemas analisados exigiam simplificações e generalizações que poderiam conduzir a erros na classificação do desempenho de edificações. Sobretudo no caso dos tipos arquitetônicos que fogem ao convencional, como é o caso das edificações antigas. As avaliações de uma única edificação residencial do período georgiano – anos 1820 – em Edimburgo, realizadas em cada uma das ferramentas, foram díspares a ponto de impossibilitar a confirmação da confiabilidade de cada um dos resultados.

Nicoletti (2009) e Ascione, Rossi e Vanoli (2011) utilizaram uma ferramenta mais robusta para avaliar o enquadramento de edifícios históricos em regulamentos de eficiência energética. No caso, empregaram o *EnergyPlus*, pacote de simulação dinâmica desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (CRAWLEY, 2001). Entretanto, mesmo ferramentas de simulação mais consistentes – atreladas ou não a regulamentos de eficiência energética – admitem imprecisões por conta de simplificações utilizadas nos cálculos. Por outro lado, Murray, Rocher e O’Sullivan (2011), ao comparar a simulação dinâmica a métodos estáticos na avaliação de alternativas de reabilitação, defendem que esses últimos são mais que suficientes.

2.4.2 Construção do modelo para simulação computacional de edificações

A utilização de simulações termoeenergéticas como suporte a projetos de intervenção em edificações existentes envolve, primeiramente, a construção do modelo de acordo com a condição real do edifício (CLUVER; RANDALL, 2010). No caso da simulação termoeenergética, os dados de entrada do modelo englobam as variáveis que interferem no consumo de energia e no desempenho térmico da edificação. De forma geral, podem ser divididos em quatro grandes grupos:

- Características arquitetônicas: forma da edificação; materiais e propriedades dos componentes utilizados nos pisos, paredes, janelas e cobertura (inclusive densidade, condutividade térmica e calor específico); elementos de sombreamento; localização; orientação;
- Dados climáticos: registros horários de temperatura, umidade, radiação solar e regime dos ventos anuais ou de um dado período, representativos da zona climática onde se localiza a edificação em análise;
- Regime de utilização da edificação: número de usuários, tipos e rotinas de atividades desenvolvidas na edificação;
- Cargas e usos finais de energia: consumo de energia pelos sistemas de calefação, ventilação, refrigeração, iluminação e equipamentos elétricos.

As características arquitetônicas e construtivas de uma edificação influenciam nos mecanismos de trocas de energia térmica (que ocorrem por condução, convecção e radiação), umidade e ar entre seus ambientes internos e o meio externo. São determinantes as relações geométricas entre suas superfícies, sua constituição – inclusive número, espessura e posição das camadas componentes –, e as propriedades termofísicas dos materiais construtivos.

Uma vez restituídas virtualmente as características físicas da edificação, o modelo base da simulação computacional deve ser complementado com informações sobre as cargas internas e usos finais de energia, bem como do regime de utilização da edificação. No caso de uma edificação em uso, tais dados podem ser levantados

por meio da realização de uma auditoria energética. Em construções novas ou edifícios existentes desocupados – ou que serão readequados a novos padrões de uso após a reabilitação –, tais informações deverão ser obtidas nas especificações de projeto.

A confiabilidade dos resultados das simulações computacionais depende da qualidade dos dados que são inseridos no modelo. No caso de edifícios existentes, os modelos das simulações podem ser calibrados. Isto significa que os resultados dos parâmetros simulados podem ser confrontados com medições realizadas no edifício real, ou ainda, com o histórico mensal de consumo e demanda de energia. A possibilidade de calibração do modelo é uma das vantagens dos projetos de reabilitação de edificações em relação ao planejamento de novas construções (CLUVER; RANDALL, 2010; DOE, 2006). Estas, na impossibilidade de se comparar resultados da simulação com dados reais, podem vir a apresentar, depois de construídas, um desempenho aquém do previsto em projeto.

2.4.3 Avaliação de alternativas de reabilitação usando simulação computacional de edificações

Escolhidas a(s) ferramenta(s) e abordagens, após a construção do modelo e, se for o caso, respectiva calibração, procede-se à avaliação do desempenho térmico da edificação original. Esse procedimento auxilia na definição das estratégias que serão adotadas no projeto de preservação ou de reabilitação, além de determinar um cenário base para a avaliação da eficácia das intervenções que serão simuladas (GEVA, 2010).

O passo seguinte é a criação de diferentes cenários envolvendo as alternativas de reabilitação termoenergética que podem ser propostas para a edificação (CLUVER; RANDALL, 2010). Tais cenários podem contemplar apenas e tão somente medidas simples, como a substituição de equipamentos de iluminação, calefação, refrigeração, ventilação e aquecimento de água por outros mais eficientes. No âmbito deste estudo, que aborda edificações de interesse para preservação, interessam as medidas com maior potencial de impacto visual e estrutural. Estas envolvem, essencialmente, intervenções no envoltório, como a instalação de

isolamento térmico nos pisos, paredes e cobertura, reforma ou substituição de aberturas, entre outros.

Cluver e Randall (2010) sugerem uma abordagem na qual se seleciona uma série de possíveis alternativas de projeto e simula-se cada uma delas separadamente. Desta forma, pode-se isolar e avaliar o efeito de cada intervenção no comportamento da edificação. Em seguida, criam-se cenários com combinações de diferentes alternativas de projeto. Isso porque determinadas soluções podem, individualmente, melhorar a eficiência da edificação, mas, não raro, uma determinada intervenção, em combinação com outra, pode ter seus efeitos anulados ou mesmo revertidos. Esse é quase que um procedimento padrão, não importando se a edificação é antiga ou não. A exemplo de Cluver e Randall (2010), Ascione, Rossi e Vanoli (2011), seguiram fórmula semelhante, também na simulação de edificação histórica.

São poucas, no Brasil, as pesquisas envolvendo a simulação de edificações históricas em estudos de reabilitação para eficiência energética. Destacam-se alguns trabalhos realizados no âmbito do laboratório “Qualidade ambiental e iluminação no espaço construído”, da Universidade de Brasília, justamente com edifícios do patrimônio moderno (AMORIM; BRAGA; CHRISTAKOU; GRILLO; *et al.*, 2003; AMORIM; BRAGA; LIMA; CHRISTAKOU; *et al.*, 2007; NICOLETTI, 2009).

2.5 PAINEL DE ESPECIALISTAS

*La qualité d'un raisonnement et sa
clarté sont cependant des critères
subjectifs, dépendants de l'utilisateur.
Ainsi comment évaluer qu'une
conclusion et que le raisonnement
suivis sont corrects et/ou meilleurs
que d'autres?*
(SOARES, 1994)

A análise de ciclo de vida deve ser tão quantitativa quanto possível, mas, em várias de suas etapas metodológicas, também requer julgamentos de valor, desde a definição do objetivo e escopo da análise até as ponderações para a agregação de resultados de

impacto de ciclo de vida. Sendo uma avaliação realizada a partir de informações *a priori* incompletas ou em evolução – que pode ser constante –, o juízo de valor requer o uso de métodos que muitas vezes extrapolam as possibilidades das ciências naturais. Curran (2008) sugere a consulta a um painel de especialistas para apoiar a tomada de decisão e fundamentar os juízos de valor em análises de ciclo de vida.

Em um painel de especialistas, as avaliações são realizadas por observadores que detêm o conhecimento ou formação em uma área específica. O especialista é um profissional da área que adaptou heurísticamente a teoria por sua própria prática e experiência. É capaz de analisar temas complexos e controversos e realizar avaliações mais objetivas e, por assim dizer, válidas – mesmo que recorrendo a considerações empíricas e precárias (PINHEIRO; FARIAS; ABE-LIMA, 2013; SOARES, 1994; TAYLOR; ZUBE; SELL, 1987). Se a aquisição de conhecimento para a tomada de decisão é hoje um método consolidado para a resolução de problemas qualitativos (SOARES, 1994), a consulta a um painel é definida como uma técnica de pesquisa exatamente pelas habilidades específicas dos especialistas (PINHEIRO; FARIAS; ABE-LIMA, 2013).

Em uma pesquisa, pode-se utilizar um painel de especialistas tanto para a coleta de dados em si, quanto para o estabelecimento das diretrizes de investigação. No segundo caso, recorre-se aos especialistas para calibrar ou validar procedimentos, seja tomando sua avaliação como um parecer final, seja analisando criticamente suas opiniões, aceitando-as ou refutando-as em função dos objetivos do estudo. Nessa lógica, o painel de especialistas não deve ser confundido com um painel de consenso. Este último busca atingir o consenso em processos decisórios, desempenhando o papel de definição do parecer final. Ao contrário de um painel de especialistas, um painel de consenso pode ser composto também por não especialistas, como nos métodos que fazem uso de júri (WORTMAN, 2001).

Soares (1994) e Wortman (2001) elencaram alguns métodos de aquisição de conhecimento dos especialistas:

- Método *Ad Hoc*: tipo de painel onde os especialistas são confrontados em encontros face a face para analisar questões específicas (WORTMAN, 2001);
- Método *Delphi*: No método *Delphi* (DALKEY, 1969), não há encontros face a face e os contatos são feitos de forma anônima através de um mediador. Este procedimento reduz os riscos de dominância de um membro específico no painel, assim como evita problemas como a falta de agenda dos especialistas. O conhecimento adquirido pode ser agregado por métodos quantitativos (WORTMAN, 2001);
- Análise de documentos: revisão sistemática qualitativa de documentos publicados por especialistas sobre o assunto em questão. Uma vez que se baseia em evidências comprovadas pelos especialistas e não em sua opinião, evitam-se as subjetividades dos outros métodos. Entretanto, “documentos fornecem informações valiosas sobre o conhecimento do conteúdo, mas eles raramente podem transmitir experiência” (SOARES, 1994). Pode empregar técnicas de metanálise, onde o conhecimento é sumarizado empregando-se métodos quantitativos (WORTMAN, 2001), procedimento comum em pesquisas sobre estudos clínicos nas áreas da saúde.

Na consulta ao especialista, pode-se ainda analisar seu discurso através de entrevistas estruturadas; observar seu comportamento frente a um caso real ou simulado; ou utilizar-se de técnicas de reconstrução pessoal, na qual o especialista é instado a relatar os conceitos que utiliza para a tomada de decisão (SOARES, 1994). O método do júri, citado por Wortman (2001), assim como as ferramentas computacionais de apoio à aquisição de conhecimentos (SOARES, 1994), foram omitidas na listagem por não serem adequados a este trabalho.

Tanto em um painel de consenso quanto em um painel de especialistas, a concordância de ideias nem sempre “é resultado de (...) entendimento mútuo”, mas sim “de suposições superficiais e negligência na consideração de consequências potencialmente problemáticas, (...) mantidas sem discussão por influência de alguns participantes.” (SABOYA, 2013). Em seu manual de métodos de avaliação para assistência externa à União Europeia, a *EuropeAid*

alerta para o risco de que o ponto de vista de um especialista mais influente seja dominante no painel (EUROPEAN COMMISSION - EUROPEAID, 2006).

Seja o painel de consenso ou de especialistas, a falta de imparcialidade dos membros também é um problema a ser enfrentado, não importa qual a técnica empregada na aquisição dos conhecimentos (WORTMAN, 2001). Essa situação pode ocorrer mesmo na análise de documentos, onde a omissão ou seleção de alguns documentos pode influenciar na resposta à questão colocada, muito embora a parcialidade – neste caso, do pesquisador – possa ser mais facilmente identificada. A parcialidade também pode ser contornada a partir da combinação de dois ou mais dos métodos elencados (WORTMAN, 2001).

Na definição do painel, algumas orientações quanto à composição e equilíbrio entre os membros devem ser seguidas. A composição refere-se aos conhecimentos e experiências necessários para o estudo em questão. O equilíbrio diz respeito à representação de diferentes pontos de vista sobre o objeto de estudo (THE ROYAL SOCIETY OF CANADA, 2010). O manual de procedimentos para painel de especialistas da *Royal Society of Canada* recomenda que os membros selecionados não sejam defensores enfáticos de uma ou outra visão das questões avaliadas, sobretudo quando os pontos de vista não estão sujeitos à comprovação factual (THE ROYAL SOCIETY OF CANADA, 2010). Não é possível estabelecer na literatura algum consenso quanto ao número de especialistas a serem envolvidos em um painel. O próprio manual de métodos da *EuropeAid* foi avaliado por um painel de cinco especialistas. Mas o número pode chegar a centenas, como é o caso do IPCC, por exemplo.

Por fim, além da questão da parcialidade e da possível influência de um ponto de vista dominante, o painel de especialistas pode ainda passar pela autocensura dos próprios especialistas: por se sentirem criticados em suas habilidades; por temerem a apropriação de seus conhecimentos; por acharem extenuante ou profissionalmente desinteressante a participação no painel; por terem críticas ou mesmo discordarem dos propósitos do trabalho (SOARES, 1994). Por outro lado, dentre as principais vantagens de se recorrer a um

painel de especialistas, pode-se citar a credibilidade das conclusões e a flexibilidade em relação à variedade de situações avaliadas (EUROPEAN COMMISSION - EUROPEAID, 2006).

Soares (1994) já apontava para a dificuldade de se estabelecer uma metodologia totalmente satisfatória para a consulta a um painel de especialistas dada a complexidade dos resultados obtidos. Afinal, não importam apenas as conclusões, mas também o raciocínio empregado. Tal preocupação persiste ainda hoje. Em um estudo sobre teoria do planejamento urbano baseada em decisões, Saboya (2013) concluiu que, para além de “simulações, modelos, estimativas, mapas, dados numéricos e estudos substantivos em geral, é forçoso incorporar os aspectos processuais como igualmente importantes e, neles, considerar as limitações cognitivas e seus impactos nos processos decisórios”.

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A REVISÃO DA LITERATURA

*The perspective on stewardship of
built heritage needs to shift to a
presumption in favour of reuse. [...]
Currently, the challenge is to prove
that an old building is so valuable
that it ought to be saved; rather the
owner/developer should be required
to prove that an old building cannot
be adapted to new use
(GUNN, 2001).*

A revisão da literatura buscou, primeiramente, construir um referencial teórico em torno do tema da reabilitação de edificações existentes e suas implicações no desenvolvimento sustentável. Em seguida, foram abordados os instrumentos que serão empregados no método proposto para este trabalho: a análise de ciclo de vida, a simulação termoenérgica de edificações e o painel de especialistas. Discutiu-se a problemática relacionada à aplicação dessas ferramentas na avaliação de edifícios antigos, bem como questões como a definição de unidade funcional, necessidade de dados, fontes de incertezas etc.

Entre um tópico e outro, foi apresentado o estado-da-arte na avaliação da viabilidade ambiental da reabilitação de edificações, desde os primeiros estudos sobre energia incorporada, passando pelos inventários de carbono incorporado, até as análises de ciclo de vida mais compreensivas. Não são muitos, inclusive na literatura internacional, os trabalhos que realizaram análises de ciclo de vida confrontando a reabilitação de edificações existentes com a hipótese de sua demolição e construção de novas edificações. No Brasil, até o momento não há trabalho divulgado, sem aqui se restringir somente às pesquisas com edificações de interesse para preservação.

As pesquisas citadas anteriormente demonstram que o consumo de energia para a operação das edificações facilmente supera a energia incorporada em sua construção. Tal constatação poderia levar à conclusão de que não se justifica depreender esforços em inventários de energia incorporada ou mesmo em análises de ciclo de vida (TRUSTY, 2006). Entretanto, na medida em que as edificações devam tornar-se cada vez mais eficientes, o fiel da balança entre a energia incorporada e a energia de operação tende a mudar de lado. Não só pelo fato de consumo de energia na operação diminuir e, portanto, pesar menos no cômputo geral, mas, também, por que edificações mais eficientes podem vir a ser mais complexas em sua concepção; ou seja, de forma geral, incorporam mais matéria e energia (GOLDSTEIN; BURT; HORNER; ZIGELBAUM, 2010).

De forma geral, as pesquisas realizadas no exterior apontaram para uma vantagem, em termos ambientais, da opção da reabilitação sobre a nova construção. Entretanto, as conclusões daquelas análises não podem ser simplesmente estendidas à realidade brasileira. Aqui, as condições climáticas são diferentes. Além disso, os padrões construtivos não são os mesmos e a discrepância tecnológica entre as edificações novas e aquelas mais antigas não é tão grande, dado o recente desenvolvimento de normas de desempenho e regulamentos de eficiência energética. A realização de estudos que possibilitem comparações entre reabilitar o estoque edificado brasileiro e construir o novo é uma lacuna a ser preenchida. No caso de se constatar a reabilitação como uma prática viável – sempre do ponto de vista estritamente ambiental – também para o Brasil, há ainda que se propor um método que possa ser incorporado às políticas urbanísticas nacionais.

As pesquisas revisadas apresentam ainda alguns espaços para aprimoramentos, sobretudo no que diz respeito à avaliação das edificações na etapa de uso do seu ciclo de vida. Identificou-se que métodos mais robustos podem ser utilizados para estimar consumo de energia para operação dos edifícios, como a simulação computacional. Embora com limitações, a situação em que as simulações computacionais oferecem maior confiabilidade de aplicação é justamente na comparação de diferentes alternativas de projeto para uma mesma edificação (HENSEN; DJUNAEDY; RADOŠEVIĆ; YAHIAOUI, 2004), caso típico dos trabalhos de reabilitação.

Observou-se na literatura, ainda, uma grande diversidade de abordagens para a definição do escopo das análises de ciclo de vida comparativas entre reabilitação vs. demolição e nova construção. Foi apontado que a consulta a um painel de especialistas seria uma alternativa interessante para auxiliar na estruturação da comparação. Constatou-se que em se tratando de sistemas complexos – como os ecológicos, ambientais e sociais –, o adequado é que a participação dos especialistas se coloque mais como processo do que como produto. Não somente “como estratégia de confirmação de diagnósticos, mas como meio para obter um dos pontos de vista que compõem o cenário complexo e múltiplo das representações do fenômeno investigado” (PINHEIRO; FARIAS; ABE-LIMA, 2013). Esta é a postura adotada no presente trabalho.

3 MATERIAIS E MÉTODO

O método aqui proposto para avaliar a viabilidade ambiental da reabilitação de edificações existentes aplica-se a edificações comerciais, de serviços ou públicas. Estas categorias são as primeiras a se submeterem compulsoriamente ao regulamento de eficiência energética do sistema brasileiro de etiquetagem de edificações (MME, 2011). Portanto, compõem a parcela do estoque edificado brasileiro potencialmente mais propícia a receber reformas para se adequar ao regulamento, ou mesmo a sofrer demolições e substituição.

O desenvolvimento do método compreendeu os seguintes processos:

- Elaboração do modelo conceitual do método de avaliação da viabilidade ambiental da reabilitação de edificações;
- Revisão do modelo conceitual por painel de especialistas;
- Teste do modelo conceitual a partir de um exemplo de aplicação.

A elaboração do modelo conceitual se fez a partir da combinação de dois diferentes métodos de emprego de um painel de especialistas, em duas diferentes etapas. Na primeira, procedeu-se à análise documental: revisão sistemática qualitativa de documentos – instrumentos, regulamentos, normas, métodos e pareceres relacionados à análise de desempenho ou de ciclo de vida de edificações – e de pesquisas com temáticas semelhantes aos objetivos deste trabalho. Os documentos analisados, sumarizados no capítulo anterior, foram retomados neste capítulo nas questões em que sustentam uma ou mais premissas adotadas na elaboração do modelo conceitual. A metanálise não se aplica na pesquisa devido à heterogeneidade dos documentos analisados. A partir do modelo conceitual proposto, o método foi testado utilizando-se um edifício real, o que encadeou refinamentos sucessivos ao modelo conceitual. A elaboração do modelo conceitual e o teste do modelo são, portanto, passos indissociáveis. Concomitantemente, realizou-se a segunda etapa do processo de revisão pelo painel de especialistas na qual, a exemplo do método *Delphi* (DALKEY, 1969), as opiniões de um grupo de especialistas são coletadas por meio de

questionários. Nesta etapa, especialistas de diferentes áreas responderam a questões relacionadas às suas respectivas áreas de conhecimento, avaliando as premissas adotadas no método proposto. A inserção do painel de especialistas se deu mais na perspectiva de processo que de produto, de modo que a interação realizador-especialista também constituiu uma etapa de refinamento do método (PINHEIRO; FARIAS; ABE-LIMA, 2013).

No método proposto, a viabilidade ambiental da reabilitação de edificações existentes é avaliada a partir da comparação com uma medida de referência, no caso, uma edificação nova. Nesta abordagem, do tipo *benchmarking*, delinea-se o perfil dos efeitos ambientais relacionados com demolições parciais, entradas e saídas de insumos e obras envolvidas na reabilitação, bem como dos impactos decorrentes do uso da edificação reabilitada. Faz-se o mesmo para uma edificação nova e equivalente em função e desempenho – a edificação de referência. O *benchmark* é dado pela construção e operação da nova edificação, mas considerando também a demolição completa do edifício existente para que esta lhe ocupe o lugar (TRUSTY, 2004).

Portanto, dois cenários são utilizados na comparação: um cenário em que a edificação existente é demolida e substituída por uma nova edificação – o “cenário com nova construção”; e um segundo cenário em que a edificação existente é reabilitada – o “cenário com reabilitação”. O cenário com reabilitação contempla, por sua vez, dois casos: o “caso base”, no qual a reabilitação da edificação considera apenas intervenções de restauro e conservação; e um segundo caso em que são avaliadas intervenções na edificação existente para que esta apresente desempenho termoenergético melhorado, chamado “reabilitação com eficiência energética”. O critério do desempenho termoenergético foi estabelecido por ser o consumo de energia para operação um dos parâmetros com mais impacto no estágio de uso do ciclo de vida de uma edificação. Para representar o cenário com nova construção, é proposto um arquétipo que atende critérios de comparabilidade com a edificação existente. O arquétipo, chamado de “nova edificação teórica”, é parametrizado com referenciais estatísticos dos padrões construtivos atuais da região onde se localiza a edificação existente. O patamar de eficiência energética adotado para a “nova edificação

teórica” é equivalente ao nível de eficiência energética mais elevado nos Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos, o RTQ-C (MDIC/INMETRO, 2010). O RTQ-C é um regulamento já vigente no sistema brasileiro de etiquetagem de edificações (MME, 2011). Portanto, trata-se de um instrumento que pode ser mais facilmente incorporado em futuras políticas públicas visando à reabilitação de edificações. Desta forma, têm-se um parâmetro para classificar o nível de eficiência energética da edificação existente à luz do desempenho almejado em instrumento regulatório para construções novas. A Figura 3.1 expressa os cenários comparados:

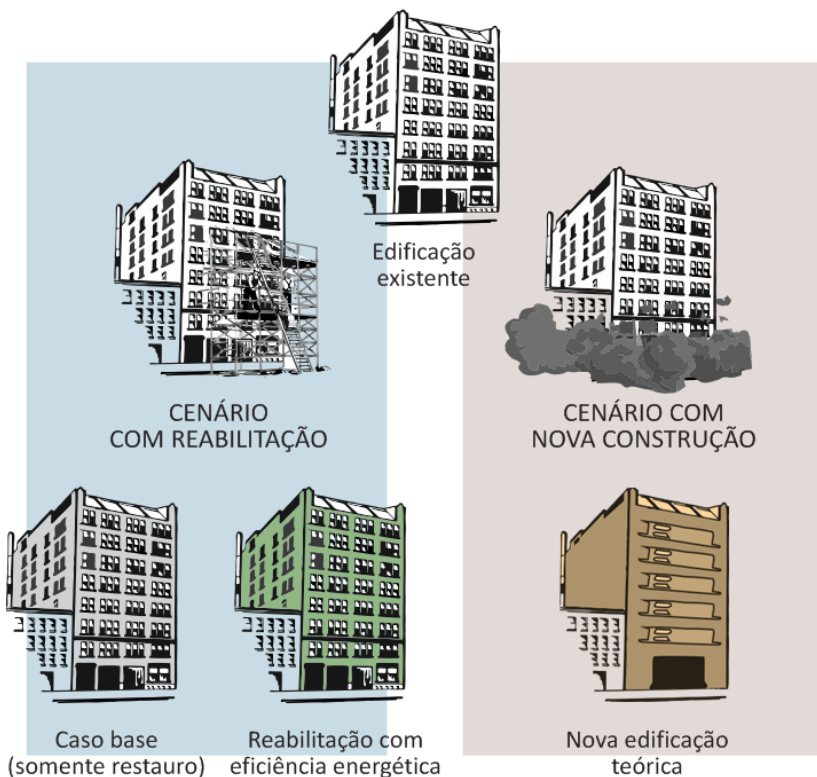


Figura 3.1 – Cenários avaliados na análise de ciclo de vida proposta.

O processo de comparação baseia-se em princípios de análise de ciclo de vida, seguindo, tanto quanto possível, a estrutura metodológica prescrita na série de normas ISO 14040 (ABNT, 2009a, 2009b). Estão contempladas no método as seguintes etapas obrigatórias de uma análise de ciclo de vida: 1) definição de objetivo e escopo; 2) análise de inventário; e 3) avaliação de impacto de ciclo de vida.

O método adota a abordagem de impacto ambiental evitado – conforme já abordado na introdução deste trabalho (MENZIES, 2011). A partir deste princípio, os efeitos incorporados e recorrentes do ciclo de vida da edificação existente até o momento em que se decide pela reabilitação – ponto inicial da análise de ciclo de vida – não são creditados negativamente para a nova construção, nem positivamente na reabilitação. Entretanto, são contabilizados os efeitos de fim de vida relacionados à demolição total do edifício existente no cenário com nova construção; bem como aos materiais suprimidos quando da reabilitação, isto é, as demolições seletivas no cenário com reabilitação (ver Figura 3.2)

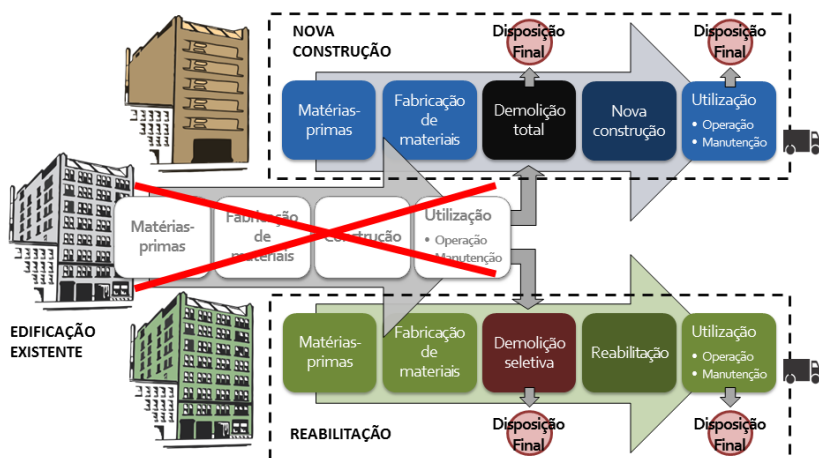


Figura 3.2 – Etapas do ciclo de vida consideradas de acordo com o conceito do impacto ambiental evitado.

Uma análise de ciclo de vida tradicional considera o ciclo de vida de uma edificação em uma sequência de etapas (extração de matérias-

primas, construção, operação) que terminam com a demolição, seguida da reutilização, reciclagem ou disposição final dos resíduos. No presente procedimento, adota-se uma abordagem cíclica, no qual o estágio de uso da edificação pode ser renovado continuamente com a reabilitação, tal qual proposto por Erlandsson e Borg (2003). Portanto, é excluída do escopo a demolição ao final do estágio de uso da edificação existente no cenário com reabilitação e da nova edificação no cenário com nova construção. A demolição de edificação existente é considerada apenas no início do ciclo de vida considerado para a nova edificação, para *benchmarking*, ou seja, para a definição do marco de referência: o cenário com nova construção. Tal abordagem é condizente com a proposta inicial deste trabalho, que sublinha a preservação do patrimônio arquitetônico.

Assim, como resultados da análise de ciclo de vida são estimados e quantificados:

- 1) Os efeitos incorporados iniciais dos materiais empregados na reabilitação e na nova construção, inclusive transporte;
- 2) Os efeitos de utilização, que englobam os efeitos de operação – relacionados ao uso de energia pelas edificações –, e os efeitos incorporados recorrentes, relacionados às novas entradas e saídas de materiais por conta da substituição e manutenção de componentes, inclusive transporte, e;
- 3) Os efeitos de final de vida, resultantes da destinação de materiais para disposição final.

Entende-se por “efeitos” as repercussões ou impactos ambientais – sejam eles positivos ou negativos – relacionados ao ciclo de vida, ou etapas do ciclo de vida, de produtos e serviços. A Figura 3.3 representa as etapas dos ciclos de vida envolvidas na quantificação dos efeitos ambientais do cenário com nova construção e do cenário com reabilitação.

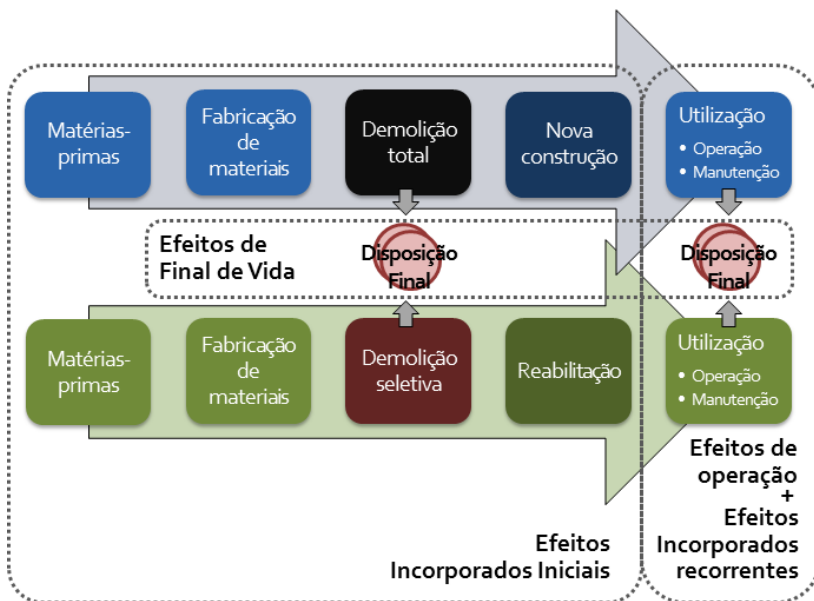


Figura 3.3 –Efeitos ambientais analisados no cenário com nova construção (acima) e no cenário com reabilitação.

A Figura 3.4 sumariza a sequência de procedimentos empregada no exemplo de aplicação do modelo conceitual. A partir do levantamento arquitetônico de uma edificação selecionada para o estudo, as composições e quantitativos de materiais para o inventário de ciclo de vida foram realizadas com apoio de Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos (TCPO). Os efeitos de operação, ou seja, o consumo de energia para a operação das edificações em ambos os cenários foi estimado através de simulações termoenergéticas realizadas no *EnergyPlus V8.0.0* (CRAWLEY; LAWRIE, 2000; CRAWLEY, 2001), programa validado pela *ASHRAE Standard 140* (HENNINGER; WITTE, 2004). O inventário de ciclo de vida relacionado aos efeitos incorporados e de final de vida utilizou bases de dados internacionais avalizadas, no caso, a *ecoinvent v.2.2* (ALTHAUS; DOKA; DONES; HECK; *et al.*, 2007). A modelagem do inventário do ciclo de vida e as análises de impacto de ciclo de vida foram realizadas no programa computacional de análise de ciclo de vida *SimaPro* (PRÉ CONSULTANTS, 2012). A viabilidade ambiental da reabilitação é

avaliada a partir da comparação dos efeitos ambientais – por categoria de impacto – acumulados ao longo do ciclo de vida analisado em cada um dos cenários.

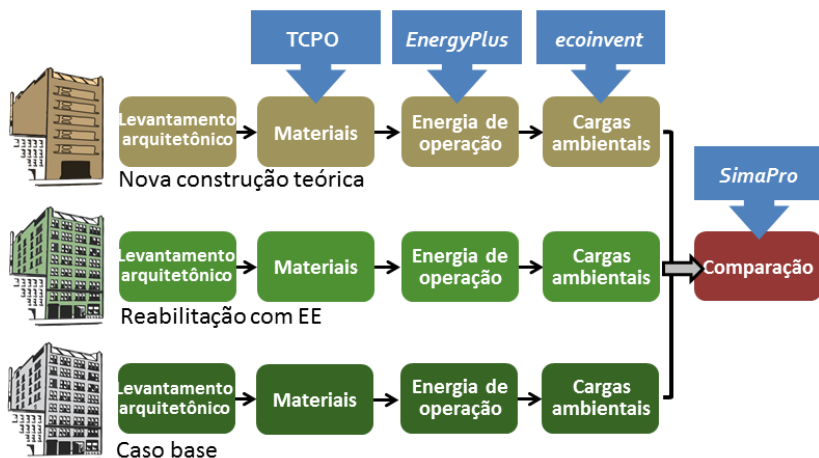


Figura 3.4 – Síntese da sequência de procedimentos proposta no modelo conceitual do método de avaliação da viabilidade ambiental da reabilitação.

No exemplo de aplicação método de avaliação da viabilidade ambiental da reabilitação, foram testados os seguintes métodos de avaliação de impacto de ciclo de vida, seguidos de sua respectiva unidade:

- Demanda Energética Acumulada (*Cumulative energy demand*), que calcula a demanda total de energia primária ao longo do ciclo de vida (em MJ);
- *ReCiPe*, que estima os danos à saúde humana (em DALY), danos à diversidade dos ecossistemas (em espécies x ano), danos à disponibilidade de recursos abióticos (em custo excedente);
- Pegada Ecológica (hectares globais).

O teste do modelo conceitual no exemplo de aplicação será explicitado em detalhes no capítulo 5, como resultado da pesquisa, uma vez que o objetivo principal deste trabalho é a proposição de

um método para avaliar a viabilidade ambiental da reabilitação e não a avaliação de uma edificação em específico. Assim, no capítulo 5, são tratados itens de método específicos à realização do teste exemplo. Esta divisão se dá porque um usuário que venha a empregar o método para avaliar outra edificação, que não a mesma empregada no exemplo de aplicação do método, terá que lidar com as particularidades específicas daquela outra edificação.

3.1 ELABORAÇÃO DO MODELO CONCEITUAL DO MÉTODO DE AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE AMBIENTAL DA REABILITAÇÃO DE EDIFICAÇÕES

Nos itens a seguir, são detalhados os critérios que foram adotados para definir cada um dos parâmetros do modelo conceitual do método de avaliação da viabilidade ambiental da reabilitação de edifícios existentes.

3.1.1 Modelagem dos cenários para a comparação

Para o modelo conceitual, foram propostos dois cenários a serem comparados: o cenário com reabilitação, que se divide em caso base e diferentes casos de reabilitação com eficiência energética; e o cenário com nova construção, ambos descritos a seguir.

3.1.1.1 *Cenário com reabilitação: definição do caso base – restauro do edifício existente*

O caso base é modelado a partir do levantamento arquitetônico de um edifício existente, no qual são simuladas intervenções de restauro e de conservação suficientes para proporcionar-lhe um novo estágio de uso em seu ciclo de vida. Não é considerada nenhuma medida de conservação de energia. Intervenções de restauro podem contemplar a demolição de anexos considerados indesejados; a reconstrução, se for o caso, de elementos originais perdidos; o tratamento de patologias construtivas; a substituição ou recuperação de elementos deteriorados; a renovação de revestimentos de pisos, tetos, paredes e repinturas. Desta forma, o cenário com reabilitação pressupõe a realização de demolições seletivas na edificação.

Deve ser realizado o cadastramento arquitetônico da edificação existente a partir de toda documentação (projeto original, memoriais descritivos, fotografias, cadastramentos anteriores) obtida em prefeituras, arquivos históricos, com proprietários ou projetistas. Na ausência, incompletude ou desatualização da documentação, deve-se proceder a medições e levantamentos *in situ*. O cadastramento deve ser suficientemente detalhado de forma a fornecer os dados necessários para a construção dos modelos para as simulações termoenergéticas (geometria e propriedades termofísicas dos materiais) e para a elaboração do inventário de ciclo de vida (quantitativos e composições de materiais).

O passo seguinte é a elaboração da proposta de reabilitação, que compreende a definição das demolições e construções envolvidas nas readequações de uso e desempenho (exceto termoenergético) e nas obras de renovação, conservação ou restauração da edificação. Também são identificadas as futuras manutenções e substituições de componentes ao longo da vida útil da edificação.

3.1.1.2 Cenário com reabilitação: definição do caso reabilitação com eficiência energética

No caso da reabilitação com eficiência energética, o modelo do caso base é modificado de forma a reduzir o seu consumo de energia para operação. As intervenções contemplam medidas de conservação de energia como: redimensionamento ou instalação de proteções solares; aplicação de isolamento térmico na cobertura; substituição de vidros ou de esquadrias externas; alteração de cores ou revestimentos das fachadas.

As modificações realizadas no modelo da reabilitação com eficiência energética são balizados pelos princípios da preservação do patrimônio edificado tomados a partir da abordagem crítico-conservativa. Essa vertente teórica da preservação, tal qual aquela chamada “conservação integral”, prescreve a distinguibilidade das intervenções em relação ao substrato histórico. A inovação no bem patrimonializado é admitida, desde que tenha um caráter contemporâneo e seja passível de diferenciação. Todavia, diferentemente da conservação integral, a postura crítico-conservativa permite, “quando necessário, o uso de recursos

criativos (utilizados, porém, com respeito pela obra e não em detrimento dela) para tratar várias questões [...] envolvidas na restauração, como [...] remoção de adições e reintegração de lacunas” (KÜHL, 2008). “No polo oposto, encontra-se a chamada ‘manutenção-repristinação’ [...] que propõe o tratamento da obra por meio de manutenções ou integrações, ordinárias e extraordinárias, retomando formas e técnicas do passado” (KÜHL, 2004). Entretanto, esta última postura não é bem aceita no contexto brasileiro.

No exemplo de aplicação do método são consideradas somente medidas de conservação de energia realizadas através de melhorias no envoltório. As intervenções no envoltório de edifícios de valor cultural são aquelas que provocam maiores perturbações ao bem patrimonial, portanto, envolvem maior complexidade construtiva e apresentam maior relevância para este estudo.

3.1.1.3 Cenário com nova construção: definição da edificação de referência para a comparação – a nova edificação teórica

O cenário com nova construção representa o marco de referência para se avaliar a viabilidade da reabilitação da edificação existente. Para o método proposto, estabeleceu-se que a nova construção deve atender os seguintes critérios:

- Ser representativa da realidade construtiva atual da região onde se localiza a edificação existente;
- Ser uma referência de padrão elevado em termos de eficiência energética para operação e, nesta condição, ser adequado para a avaliação através de simulação computacional termoenergética;
- Garantir a equivalência de função e desempenho exigida em análises de ciclo de vida comparativas.

Foram levantadas as seguintes alternativas para a definição da edificação para o cenário com nova construção:

- 1) A elaboração do projeto de uma edificação nova;
- 2) A seleção de uma edificação nova real, considerada representativa a partir de análises estatísticas ou com base

- na experiência de especialistas (CORRADO; BALLARINI; CORGNATI; TALÀ, 2011);
- 3) A utilização da conformação do próprio edifício existente como base para a nova construção;
 - 4) A utilização de um arquétipo, uma edificação teórica elaborada de acordo com dados estatísticos de edifícios de mesma categoria no estoque edificado (CORRADO; BALLARINI; CORGNATI; TALÀ, 2011).

Dentre os trabalhos sobre a viabilidade ambiental da reabilitação que foram analisados, identificou-se um baseado em edificações novas em projeto (NTHP, 2012); um que utilizou a reconstrução do próprio edifício existente (ITARD; KLUNDER, 2007); três que selecionaram edificações reais (EHA, 2008; IYER-RANIGA; WONG, 2012; NTHP, 2012) e três que trabalharam com arquétipos (ATHENA SUSTAINABLE MATERIALS INSTITUTE; MORRISON HERSHFIELD LIMITED, 2009; LUCUIK; TRUSTY; HUFFMAN; PREFASI, 2010; TRUSTY, 2004). Foram consideradas também experiências brasileiras de definição de arquétipos para análise termoenergética de edificações (CARLO; TOCCOLINI; LAMBERTS, 2005; LAMBERTS; GHISI; RAMOS, 2006; MINKU, 2005; SANTANA, 2006; TAMANINI JUNIOR, 2013), assim como o RTQ-C (MDIC/INMETRO, 2010). O RTQ-C é o único instrumento legal brasileiro com prescrições para a construção de um modelo de referência de edificação, especificado no item que trata do método da simulação computacional do regulamento.

Pretende-se que o método proposto seja empregado como uma ferramenta de apoio à decisão entre reabilitar ou não uma edificação. Assim, para evitar-se dispêndio de tempo e recursos na elaboração dos projetos de arquitetura e engenharia de uma edificação nova, descartou-se, *a priori*, esta alternativa. A hipótese da seleção de uma edificação representativa real também foi desconsiderada. O *National Trust* (NTHP, 2012) utilizou edificações reais para caracterizar a nova construção (QUANTIS, 2012), tendo como consequência uma série de limitações para se garantir a equivalência de função e desempenho nas comparações. Essas limitações suscitaram questionamentos, inclusive, em relação à unidade funcional adotada, na revisão crítica realizada pelo *Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits*,

procédés et services – CIRAIG, instituição interuniversitária canadense, referência em pesquisa em análise de ciclo de vida.

A opção adotada trata-se de um modelo teórico que combina as duas últimas alternativas para a definição da edificação de referência. Utiliza-se como base a conformação do edifício existente, uma vez que, quando da simulação termoeenergética, a comparação de uma edificação com ela própria reduz as incertezas nas análises (HENSEN; DJUNAEDY; RADOŠEVIĆ; YAHIAOUI, 2004). Este princípio é o mesmo adotado no RTQ-C para definir o edifício de referência para a avaliação do nível de eficiência energética de edificações pelo método da simulação. O método da simulação do RTQ-C compara o desempenho termoeenergético de um modelo virtual do edifício real com o desempenho do modelo de um edifício de referência. No método proposto, a nova edificação teórica é, portanto, baseada no edifício de referência de nível “A” do método da simulação do RTQ-C. O modelo de referência do RTQ-C possui geometria, orientação solar, padrões de uso e de ocupação, sistemas e equipamentos instalados idênticos ao edifício ou projeto que se deseja avaliar. Entretanto, é destituído de todas as superfícies de sombreamento (tais como *brise-soleils*, marquises e platibandas). O percentual de aberturas nas fachadas, a transmitância térmica e absorvância solar das superfícies opacas é modificado de acordo com parâmetros estabelecidos para a zona bioclimática onde se localiza a edificação. O vidro empregado nas aberturas possui restrições, devendo ser do tipo simples de 3 mm de espessura, com fator solar de 0,87 (ELETROBÁS/PROCEL; LABEEE/UFSC, 2012). No método proposto, o edifício de referência do RTQ-C é atribuído de materiais e componentes construtivos de maneira a representar a média da prática construtiva atual para edificações da mesma categoria. Não são negligenciadas, contudo, as condições estabelecidas pelo RTQ-C para que o modelo represente uma edificação de nível “A” de eficiência energética. Assim, os componentes construtivos são ajustados de forma a atender os limites de transmitância térmica e de absorvância solar para o envoltório, conforme os pré-requisitos definidos no RTQ-C para a zona bioclimática da edificação em estudo.

Definidos os dois cenários – reabilitação e nova construção –, o item a seguir detalha o escopo da análise de ciclo de vida. São descritos

os procedimentos para a identificação da função das edificações que será comparada, os requisitos de desempenho para o atendimento desta função, a unidade funcional e as fronteiras do sistema.

3.1.2 Modelagem do escopo da análise de ciclo de vida

O escopo da análise de ciclo de vida proposto no modelo conceitual procurou atender aos quesitos elencados nas NBR ISO 14040 e 14044 (ABNT, 2009a, 2009b), especificados a seguir.

3.1.2.1 *Identificação da função na comparação*

A identificação da função da edificação na análise de ciclo de vida refere-se ao uso projetado para a edificação existente após a reabilitação. O uso anterior da edificação é desconsiderado. Ou seja, o método proposto pode ser utilizado inclusive para avaliar a viabilidade da reabilitação de edificações que contemplam a alteração de uso (reuso adaptativo) ou o reaproveitamento de edificações anteriormente sem uso e desocupadas. Parte-se do pressuposto que a edificação existente, caso tenha uma função original diversa da pretendida após a reabilitação, possa ser submetida à readequação de uso. A nova edificação teórica utilizada na comparação deve abrigo o mesmo uso da edificação existente reabilitada.

3.1.2.2 *Determinação das características de desempenho*

Os requisitos de desempenho avaliados na análise de ciclo de vida são aqueles que interferem no uso e no fluxo de materiais e energia para a realização da reabilitação, da nova construção, das demolições e da manutenção das edificações; e também no consumo de energia para operação.

A modelagem de cada um dos cenários deve garantir, dentro dos quesitos avaliados, a equivalência de função e desempenho exigida em análises de ciclo de vida comparativas. A função de uma edificação é oferecer uma determinada área útil, para ser ocupada por um dado número de usuários realizando tarefas definidas e em condições específicas de conforto. Desta forma, além da área útil, os padrões de uso e de ocupação, as densidades de cargas internas e as

faixas de temperatura do ar interno devem ser análogos em todos os casos comparados. Esta condição também atende aos requisitos do método da simulação do RTQ-C para a avaliação do desempenho de edificações (ELETROBÁS/PROCEL; LABEEE/UFSC, 2012). Como as cargas internas são as mesmas, o desempenho térmico do envoltório é fator determinante no consumo de energia para operação das edificações.

Não há ainda uma norma ou regulamento brasileiro de conforto térmico em edificações. As normas de desempenho existentes, as NBR 15220 (ABNT, 2005) e 15575 (ABNT, 2013) foram desenvolvidas para edificações residenciais. No método proposto, estes requisitos são estabelecidos de acordo com o patamar mais elevado do RTQ-C (MDIC/INMETRO, 2010). O RTQ-C baseia-se nos modelos de conforto térmico da ASHRAE Standard 55/2004 (ANSI/ASHRAE, 2010) ou ISO 7730/2005 (ISO, 2005). O desempenho das edificações em termo de conforto visual, acústico e qualidade do ar interno não são contemplados no método proposto.

Tanto a edificação reabilitada quanto a nova construção devem preservar suas capacidades funcionais e desempenho durante todo o período definido na unidade funcional, prevendo-se as necessárias intervenções de manutenção ou substituição de seus sistemas e componentes. Na ausência de normas e estudos específicos sobre a durabilidade ou vida útil de edificações no Brasil, este período é determinado de acordo com a categoria “vida normal” da vida útil de projeto de edificações definida na NBR 15575-1 (ABNT, 2013). Embora a norma tenha sido desenvolvida para edificações residenciais, em seu Anexo C, que trata de considerações sobre durabilidade e vida útil, são abordados todos os tipos de edificação. A vida útil de cada um dos sistemas e componentes manuteníveis e substituíveis das edificações também é definida de acordo com a mesma norma.

3.1.2.3 Definição da unidade funcional

A unidade funcional empregada na análise de ciclo de vida é 1 (uma) vida de serviço de edificação projetada para abrigar a função definida. Esta deve funcionar em área já edificada, reutilizando-a – por meio de obra de reabilitação – ou substituindo-a – com

demolição e construção de nova edificação de mesma área útil. A vida de serviço inicia com a reabilitação da edificação existente – no cenário com reabilitação –, ou com a sua demolição – no cenário com nova construção –, e termina dentro do período previsto para uma nova reabilitação. A unidade funcional deve relacionar também a área útil disponibilizada pela edificação e os requisitos de conforto térmico e de eficiência energética.

Semanticamente, vida útil e vida de serviço são sinônimas. Entretanto, a NBR 15575 define que “o período de tempo a partir do qual se iniciam os prazos de **vida útil** deve ser sempre o da data de conclusão do edifício [grifo do autor]” (ABNT, 2013). A unidade funcional proposta para o método – 1 **vida de serviço** de edificação construída para determinado uso – contempla também as atividades de reabilitação ou de substituição de uma estrutura pré-existente. O termo vida de serviço é utilizado com este significado, buscando-se evitar confusão com o termo vida útil da norma.

A vida de serviço como unidade funcional é possível na medida em que a área útil da edificação não se altera em nenhum dos cenários comparados. O conceito de vida de serviço como unidade funcional foi tomado de Erlandsson e Levin (2005). Nesta abordagem, são contabilizadas as atividades que precisam ser realizadas para o desempenho das funções da edificação ao longo da vida útil prevista em projeto, bem como as entradas e saídas de matéria e energia envolvidas. Esse princípio é coerente com o apontamento feito na revisão crítica do estudo do *National Trust* de que o objetivo de uma análise de ciclo de vida é avaliar a função desempenhada por um produto, e não o produto em si (QUANTIS, 2012). Ademais, é consistente com o propósito deste trabalho que, assim como Erlandsson e Borg (2003), considera o ciclo de vida de uma edificação em uma perspectiva não linear. Nesse enfoque, as diferentes fases do ciclo de vida são tratadas separadamente na análise de inventário de ciclo de vida, possibilitando a exclusão ou inclusão somente daquelas consideradas adequadas ao objetivo e escopo proposto para a análise (ERLANDSSON; BORG, 2003). O estágio de uso do ciclo de vida é tratado como o intervalo de tempo esperado para que a edificação do cenário com reabilitação passe por nova reabilitação, ou a edificação do cenário com nova construção receba sua primeira reabilitação, e assim

sucessivamente. Procedimento semelhante foi adotado no estudo da *Empty Homes Agency* (EHA, 2008).

3.1.2.4 *Delimitação da fronteira do sistema*

A análise de ciclo de vida das edificações no método proposto limita-se ao sistema primário (*foreground*), que compreende dois subsistemas: a edificação em si e a sua ocupação, conforme definido por Erlandsson e Levin (2005). O primeiro pode ser dividido em atividades como construção, manutenção e obras de reabilitação. O segundo envolve atividades continuadas, vinculadas à operação da edificação, tais como o consumo de energia para condicionamento de ar e uso de equipamentos. Em consonância com o conceito de vida de serviço tomado como unidade funcional, as atividades marginais (*background*) – como alterações na estrutura urbana, tráfego de usuários etc. – não são incluídas nas fronteiras do sistema. Erlandsson e Levin (2005) apontam que essas atividades não sofreriam a interferência de diferentes alternativas de construção, por exemplo, desde que mantido o serviço prestado pela edificação.

Sinteticamente, a fronteira do sistema deve compreender, no mínimo:

1. Destinação final dos materiais provenientes da demolição total e das demolições seletivas;
2. Produção dos materiais e componentes para as obras de reabilitação e nova construção, incluindo extração de matérias-primas, processamento e transporte;
3. Reposição de materiais e componentes ao longo da vida útil dos modelos;
4. Uso de energia para operação das edificações.

Dentro dessa concepção, os estágios do ciclo de vida das edificações compreendidos no escopo da comparação são aqueles destacados na Figura 3.5.

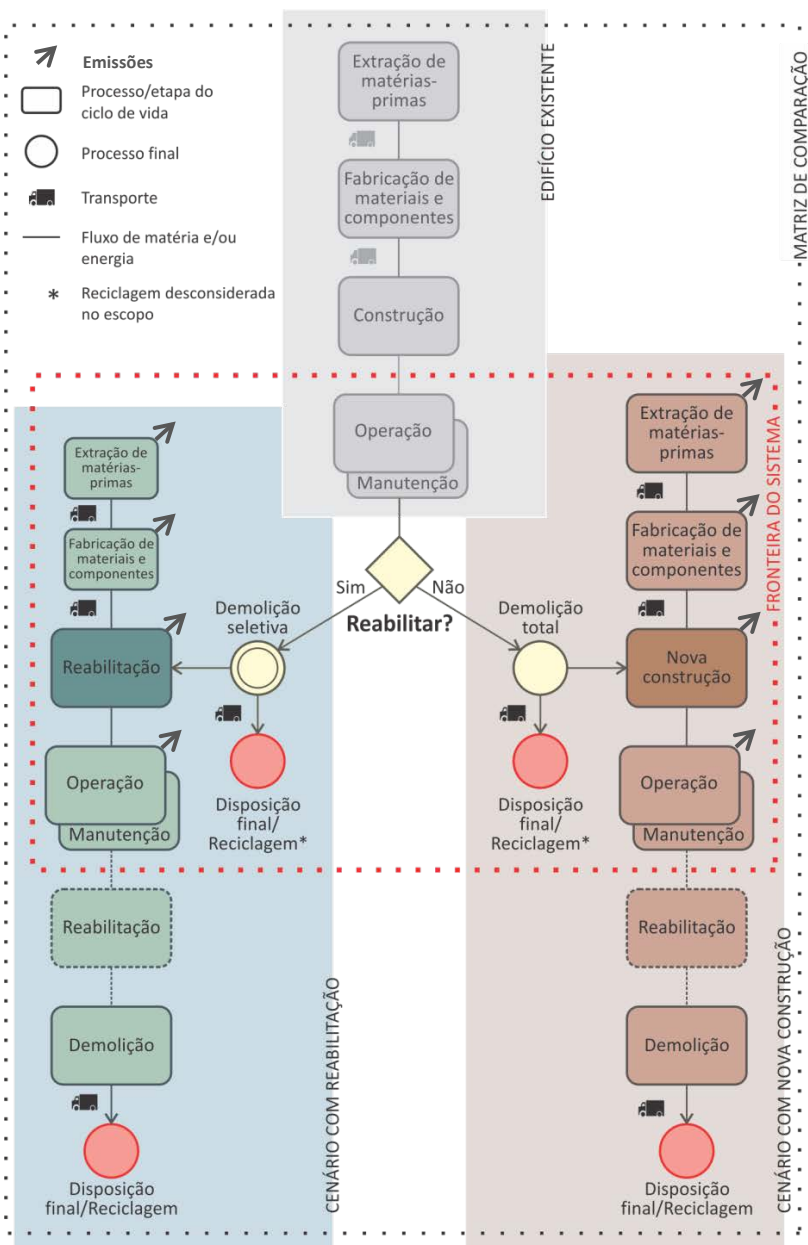


Figura 3.5 – Matriz de comparação e fronteiras do sistema da análise de ciclo de vida.

No método proposto, são consideradas no sistema as entradas e saídas de matéria e energia quando da realização das obras de restauro ou das melhorias em eficiência energética na edificação existente. Estas entradas e saídas de matéria e energia são os efeitos incorporados iniciais do cenário com reabilitação. Os efeitos incorporados iniciais consideram também aqueles envolvidos na extração de matérias-primas e fabricação dos materiais e componentes utilizados na reabilitação, bem como o transporte de material entre essas etapas e até o canteiro de obras. No decorrer da fase de uso da edificação, são incluídas as entradas e saídas relacionadas à sua utilização, que compreende os efeitos de operação e os efeitos incorporados recorrentes. Os primeiros decorrem do consumo de energia para a operação da edificação. Os demais se referem às entradas e saídas de matéria ou energia relacionadas à substituição ou manutenção de sistemas e componentes construtivos com durabilidade inferior à vida útil da edificação. A fronteira do sistema deve incluir ainda as repercussões ambientais da destinação final dos elementos e componentes demolidos ou substituídos, tanto no momento da reabilitação quanto nas atividades de manutenção. Estas repercussões perfazem os efeitos de final de vida.

A fronteira do sistema do cenário com nova construção abrange os efeitos ambientais dos mesmos estágios do cenário com reabilitação: efeitos incorporados iniciais, incorporados recorrentes, de operação e de final de vida. Entretanto, o cenário com nova construção considera a possibilidade da demolição total da edificação existente na obra inicial da nova edificação e, consequentemente, o não aproveitamento de nenhuma de suas partes. Esse fato repercute substancialmente na quantidade de matéria e energia envolvidas nos efeitos incorporados iniciais e de final de vida.

3.1.2.5 Omissões de estágios do ciclo de vida, processos ou necessidades de dados

Como se trata de uma análise comparativa, todos os processos elementares idênticos entre os cenários comparados podem ser ignorados na análise do ciclo de vida. Como pode ser observado na Figura 3.2, o edifício existente se faz presente nos dois cenários da

comparação. Assim, todo o ciclo de vida da edificação existente – e respectivas repercussões ambientais – até o momento em que se decide pela reabilitação ou nova construção pode ser excluído do escopo da análise de ciclo de vida.

3.1.2.6 Critérios de corte para a inclusão inicial de entradas e saídas

Consoante com o projeto-piloto realizado para o desenvolvimento da Metodologia Padrão para Elaboração de Inventários de Ciclo de Vida da Indústria Brasileira (IBICT, 2009), o critério de corte inicial das entradas adotado no método proposto é da ordem de 1% em termos de massa. Ou seja, podem ser excluídos do inventário de ciclo de vida todos os materiais que contribuem com menos de 1% da massa total de materiais, desde que observada sua relevância ambiental. O critério de corte deve ser reduzido, caso necessário, para expressar nos resultados da análise de ciclo de vida as entradas que, embora sua massa não contribua com mais de 1% para o sistema, produzam impacto ambiental significativo. Este é o caso, por exemplo, dos materiais isolantes.

O mesmo critério de corte é empregado na definição das medidas de conservação de energia do caso reabilitação com eficiência energética. Serão desconsideradas na análise de ciclo de vida as medidas de conservação de energia que não possibilitarem uma redução da ordem de 1% no consumo de energia estimado nas simulações computacionais para operação da edificação.

3.1.3 Modelagem do inventário de ciclo de vida

No método proposto, utilizam-se bases de dados internacionais avalizadas para o inventário de ciclo de vida. O levantamento ou a composição de uma base de dados brasileira excede os objetivos e as possibilidades dessa pesquisa. Pressupõe-se que a indústria da construção, e também as instituições de pesquisa, estarão mais dispostas ao levantamento desse tipo de dados quando a análise de ciclo de vida estiver consolidada em instrumentos fins, como políticas públicas, instrumentos regulatórios e procedimentos como o método aqui desenvolvido.

Os conjuntos de informações requeridos para a elaboração do inventário de ciclo de vida são os seguintes:

- Efeitos incorporados iniciais e recorrentes: Quantitativos de materiais utilizados nas obras de restauro e de adequação de desempenho do cenário com reabilitação; de construção no cenário com nova construção; e de manutenção em ambos os cenários, incluindo fabricação e transporte de componentes;
- Efeitos de operação: Energia demandada para a operação das edificações ao longo da vida útil;
- Efeitos de final de vida: Quantitativos de materiais encaminhados para disposição final em decorrência das remoções e demolições (seletivas e total), transporte incluso.

No exemplo de aplicação do método, o inventário utiliza a base de dados *ecoinvent* v.2.2 (ALTHAUS; DOKA; DONES; HECK; *et al.*, 2007), já que esta possui bom conjunto de processos de materiais e componentes para a construção civil. Os dados da base *ecoinvent* são confrontados com aqueles já levantados na literatura científica nacional e modificados de acordo com a realidade tecnológica e a matriz energética brasileira. Os materiais indisponíveis na base de dados do *ecoinvent* e não documentados na literatura nacional são substituídos por processos similares. Em última instância, as lacunas de dados restantes serão preenchidas com valores limite da pior condição prevista em normas e regulamentos pertinentes. No quesito transporte, definem-se valores médios para cada categoria de material, considerando a distância entre as jazidas e fabricantes e o local das obras.

3.1.3.1 *Estimativa do consumo de energia para operação*

Conforme já antecipado, a estimativa do consumo de energia para operação das edificações, em cada um dos casos comparados, é feita por meio de simulação termoenergética. O resultado das simulações termoenergéticas utilizado no inventário de ciclo de vida é o consumo anual de energia pelas edificações, em kWh.

Dado que se emprega o método da simulação do RTQ-C na determinação do nível de eficiência pretendido para a nova edificação teórica, o mesmo procedimento é utilizado para estimar o consumo de energia para operação. De acordo com o RTQ-C (MDIC/INMETRO, 2010), as simulações, em ambos os cenários comparados, devem seguir as seguintes determinações:

- Utilizar o mesmo programa de simulação;
- Processar as simulações com o mesmo arquivo climático;
- Mesma geometria e orientação com relação ao Norte Geográfico;
- Mesmo padrão de uso e ocupação da edificação e operação dos sistemas;
- Valores idênticos de densidade de carga interna;
- Sistemas de condicionamento de ar similares, com o mesmo *setpoint* de resfriamento.

Os casos avaliados neste trabalho são modelados no programa *SketchUp* utilizando a interface *OpenStudio*. O *OpenStudio* é um pacote computacional desenvolvido pelo *National Renewable Energy Laboratory* do Departamento de Energia dos Estados Unidos (NREL, 2012) que se integra ao *EnergyPlus V8.0.0* (CRAWLEY; LAWRIE, 2000; CRAWLEY, 2001) para efetuar a análise termoeenergética de edificações. A partir das simulações no *EnergyPlus* é obtido o consumo anual de energia dos modelos no estágio de uso do seu ciclo de vida. No método proposto, a densidade de ocupação e as cargas internas nas simulações representa estatisticamente uma edificação de mesmo uso e categoria, atendidos os limites estabelecidos para o nível “A” de eficiência do RTQ-C.

Como as medidas de conservação de energia avaliadas na reabilitação com eficiência energética envolvem apenas intervenções no envoltório da edificação, o procedimento empregado na avaliação segue o prescrito para a obtenção da “Etiqueta Parcial da Envoltória” no RTQ-C (MDIC/INMETRO, 2010). Para o inventário de ciclo de vida, entretanto, se faz necessário medir o consumo de energia como um todo para a operação da edificação, e não apenas sua carga térmica. Assim, modela-se um sistema de ar-condicionado para as edificações, em vez de se utilizar um sistema ideal conforme proposto no RTQ-C. O sistema de

condicionamento de ar deve ser do tipo e características previstas nas Tabelas 6.1 a 6.3 do RTQ-C, com COP estabelecido pelo método prescritivo do RTQ-C para atingir o nível “A” de eficiência. Essas especificações não só observam ao prescrito no RTQ-C, como asseguram, também, a equivalência de função e desempenho da análise de ciclo de vida.

3.1.3.2 Estimativa das composições e quantitativos de materiais

Para quantificar de maneira expedita as entradas e saídas de materiais na análise de ciclo de vida dos modelos, foi adotada a utilização de tabelas padronizadas de composições de materiais e serviços para a construção civil, como as Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos (TCPO). A TCPO, editada pela primeira vez em 1955, é a base de composições mais utilizada no Brasil (ALVES; ARAÚJO, 2010). Tavares e Lamberts (2006), Sperb (2000) e Taborianski e Prado (2012) quantificaram as entradas de materiais no inventário de ciclo de vida com base em TCPOs.

As composições dos materiais da edificação existente são estimadas com base em TCPO da época da obra. Os parâmetros retirados dessa TCPO são empregados na determinação dos efeitos de final de vida resultantes das demolições parciais do cenário com reabilitação e da demolição total do cenário com nova construção. Os quantitativos e composições dos materiais novos introduzidos na obra de reabilitação são extraídos dos memoriais de cálculo e planilhas de quantitativo do projeto executivo de reabilitação – se houver – ou estimada a partir de TCPO atuais. Os quantitativos de materiais utilizados nos elementos construtivos do modelo da nova construção também são estimados a partir de TCPO atuais.

O IPHAN, em um procedimento desenvolvido em sua Superintendência Estadual em Santa Catarina, define o estado de conservação de uma edificação como ótimo (quando o estado geral de seus componentes não apresenta degradação); bom (degradação leve, atingindo entre 0% e 20% dos componentes); regular (nível de degradação moderado, entre 20% e 40%); e ruim (degradação avançada, acima de 40%). Como as edificações comparadas devem preservar suas características de desempenho ao longo de toda a sua vida de serviço, pressupõe-se que as mesmas sejam mantidas

sempre em bom estado de conservação. Desta forma, os quantitativos de materiais referentes à manutenção das edificações, em ambos os cenários, são calculados com base na realização de reparos em 20% dos componentes manuteníveis, considerada a sua vida útil. Entende-se por reparo a remoção de material degradado (demolição parcial) e substituição por novo material. Para os componentes substituíveis, considera-se sua substituição total de acordo com a respectiva vida útil.

Todos os materiais resultantes das demolições e substituições devem ser analisados como se fossem encaminhados para disposição final. O inventário da etapa de disposição final é realizado com base na metodologia específica para a elaboração de cenários de fim de vida de materiais construtivos e de construção proposta para o *ecoinvent* (DOKA, 2009). O cenário de fim de vida deve considerar, no mínimo, os efeitos ambientais relacionados ao transporte dessa massa de materiais a um aterro sanitário, um aterro de materiais inertes, uma usina de processamento etc.

3.1.3.3 Análise de sensibilidade para refinamento da fronteira do sistema

O grau de aproveitamento dos materiais e estruturas de uma edificação pode variar de acordo com as decisões tomadas quando do projeto de reabilitação. A prática da preservação do patrimônio edificado tem, como princípio fundamental, a precedência da opção pela reparação dos elementos da edificação em vez de sua substituição. Todavia, por vezes é muito tênue o limiar entre as possibilidades de recuperar ou substituir um componente construtivo, e a tomada de decisão nesse sentido exige a realização de inspeções, ensaios e análises que extrapolam as possibilidades desse trabalho. Assim, são avaliados diferentes níveis de intervenção na edificação do cenário com reabilitação, analisados caso a caso. Embora esta abordagem prejudique o atendimento do princípio da mínima intervenção, a intenção é de avaliar a interferência de diferentes graus de intervenção nos efeitos ambientais finais da reabilitação. O nível de intervenção das obras de restauração do cenário com reabilitação será variado de acordo com os valores médios da escala de estado de conservação do IPHAN citada no item 3.1.3.2. Assim, os quantitativos de materiais

para o reparo dos componentes manuteníveis na obra inicial de reabilitação são variados em 10%, 20%, 30% e 40% de seu total na edificação existente. Os componentes não manuteníveis serão sempre 100% substituídos. Esses mesmos índices serão empregados para variar as entradas e saídas de materiais empregados nas obras de manutenção das edificações, em ambos os cenários, ao longo da vida de serviço considerada na unidade funcional. No cenário com nova construção são avaliados diferenças de produtividade na execução da nova edificação. Os quantitativos de materiais envolvidos neste caso são variados de acordo com os valores inferiores e superiores, respectivamente, dos índices de produtividade média das TCPO.

No método proposto, realiza-se ainda a análise de sensibilidade em relação ao consumo de energia para operação das edificações. Tal indicação leva em conta o peso da fase de uso no ciclo de vida energético de uma edificação e o grau de incertezas envolvido em simulações computacionais termoeenergéticas. O consumo de energia para operação é variado em $\pm 5\%$, $\pm 10\%$ e $\pm 20\%$, de acordo com os percentuais definidos pelo Anexo 31 da EIA para análises de sensibilidade e de incertezas em estudos sobre os impactos ambientais relacionados ao uso de energia em edificações (IEA ANNEX 31, 2004b).

Por fim, são efetuadas variações no período previsto para a vida de serviço das edificações – ou seja, a vida útil de projeto considerada na unidade funcional. Considerando que a vida de serviço na unidade funcional é definida de acordo com a categoria “vida normal” da vida útil de projeto de edificações definida na NBR 15575-1 (ABNT, 2013), esta é variada para menor de acordo com a categoria “vida média” e para maior de acordo com a categoria “vida longa” da mesma norma. A variação no período da vida de serviço das edificações pressupõe, conseqüentemente, a variação correspondente no seu consumo de energia para operação e no número de intervenções de manutenção.

3.1.3.4 Princípios e procedimentos de alocação

Os efeitos ambientais de final de vida de todo o material resultante das demolições seletivas do cenário com reabilitação, da demolição

total do cenário com nova construção e das substituições por conta das manutenções planejadas (em ambos os cenários) são computados na presente análise de ciclo de vida. O aproveitamento dos materiais potencialmente recicláveis resultantes das demolições consideradas nos cenários comparados deve ser contabilizado no ciclo de vida da sua próxima utilização, quando e se ela vier a ocorrer. Serão creditados em uma análise de ciclo de vida futura. Neste caso, não há, portanto, coprodutos para alocação.

Considerando o princípio do impacto ambiental evitado, a fronteira do sistema proposto considera apenas os impactos relacionados à função definida na unidade funcional da análise de ciclo de vida. Uma possível área construída maior obtida pela construção de uma nova edificação com mais pavimentos; ou outras funções que uma nova edificação pudesse abrigar e não estão contempladas na edificação existente (como antenas, heliporto etc.), não são produtos, serviços ou impactos que seriam evitados com a reabilitação da edificação existente. Assim, não são considerados nem alocados na análise de ciclo de vida.

3.1.4 Seleção do(s) método(s) de avaliação de impacto de ciclo de vida

A seleção das categorias de impacto avaliadas e dos métodos de avaliação de impacto empregado para quantificar os efeitos ambientais comparados se pauta nos seguintes critérios:

- 1) Possibilidade de correlacionar o consumo energético para a operação da edificação e a energia incorporada nos materiais e componentes;
- 2) Permitir computar as emissões de CO₂-eq, indicador já conhecido pelo setor da construção civil;
- 3) Possibilitar a análise de outros impactos ambientais além daqueles relacionados ao uso de energia;
- 4) Possibilitar a incorporação dos resultados da análise em políticas públicas existentes.

Além de atender esses critérios, os métodos de avaliação de impacto de ciclo de vida devem possuir as seguintes características:

- Ser compatível com a base de dados utilizada no inventário de ciclo de vida;
- Possuir reconhecimento na comunidade científica e ter sido descrito em publicações especializadas;
- Ter abrangência territorial global ou possibilitar a regionalização para o Brasil;
- Não negligenciar os impactos ambientais significativos relacionados às edificações, como o consumo de energia, depleção de jazidas minerais, uso do solo e emissões de particulados.

No exemplo de aplicação do método são empregados os seguintes métodos de análise de impacto de ciclo de vida: Demanda Energética Acumulada (*Cumulative energy demand*); *ReCiPe* e Pegada Ecológica (*Ecological Footprint*). A seleção desses modelos foi feita a partir da análise de diversos métodos de avaliação de impacto de ciclo de vida descritos em European Commission - JRC e IES (2010); Hirschier *et al.* (2010) e Goedkoop *et al.* (2010). Todos são compatíveis com a base *ecoinvent*.

A Demanda Energética Acumulada atende ao primeiro critério. O método possui fatores de caracterização para o consumo de recursos energéticos de cinco categorias: energia não renovável fóssil; não renovável nuclear; renovável biomassa; renovável eólica, solar e geotérmica; renovável, hídrica. A demanda total de energia, expressa em MJ, é o somatório dos resultados de cada uma dessas categorias.

Já a proposta do *ReCiPe* é de, tanto quanto possível, abordar mecanismos ambientais com validade universal, compreendendo dois conjuntos de categorias de impacto, combinando os métodos CML 2001 no nível *midpoint* e o *Eco-indicator 99* no nível *endpoint* Goedkoop *et al.* (GOEDKOOP; OELE; SCHRYVER; VIEIRA; *et al.*, 2010). No nível *midpoint*, o *ReCiPe* aborda uma categoria de impacto voltada às mudanças climáticas, cuja unidade, kgCO₂, atende ao segundo critério. Na Tabela 3.1 estão expressas as demais categorias de impacto *midpoint* abordadas pelo *ReCiPe*.

Tabela 3.1 – Categorias de impacto avaliadas pelo método *ReCiPe* ao nível *midpoint*

Categoria de Impacto	Unidade da categoria de impacto
Mudanças climáticas	kg (CO ₂ para a atmosfera)
Depleção da camada de ozônio	kg (CFC-11 para a atmosfera)
Acidificação do solo	kg (SO ₂ para a atmosfera)
Eutrofização de águas potáveis	kg (P para a água doce)
Eutrofização de águas marinhas	kg (N para a água doce)
Toxicidade humana	kg (1,4 diclorobenzeno na atmosfera urbana)
Formação de foto-oxidantes	kg (COV não metânicos para o ar)
Formação de particulados	kg (PM ₁₀ para a atmosfera)
Ecotoxicidade dos solos	kg (1,4 diclorobenzeno para o solo industrial)
Ecotoxicidade das águas potáveis	kg (1,4 diclorobenzeno para a água doce)
Ecotoxicidade das águas marinhas	kg (1,4 diclorobenzeno para os oceanos)
Radiações ionizantes	kg (U ²³⁵ para a atmosfera)
Ocupação do solo arável	m ² x ano (solo arável)
Ocupação do solo urbano	m ² x ano (solo urbano)
Transformação do ambiente natural	m ² (solo natural)
Esgotamento de mananciais	m ³ (água)
Depleção de recursos minerais	kg (Fe)
Depleção de recursos fósseis	kg (petróleo)

Fonte: Baseado em Goedkoop *et al.* (2012).

A Tabela 3.2 sumariza as categorias *endpoint* consideradas no *ReCiPe*. As relações entre as categorias *midpoint* e *endpoint* no *ReCiPe* encontram-se no Anexo B em seu formato original.

Tabela 3.2 – Categorias de impacto avaliadas pelo método *ReCiPe* ao nível *endpoint*

Categoria de Impacto	Unidade da categoria de impacto	Indicador
Danos à saúde humana	ano	DALY
Danos à diversidade dos ecossistemas	espécies x ano	Perda de espécies ao longo de um ano
Danos à disponibilidade de recursos abióticos	\$	Custo excedente

Fonte: Baseado em Goedkoop *et al.* (2012).

Por fim, é calculada a “Pegada Ecológica” (*Ecological Footprint*) de cada um dos cenários comparados, medida em hectares globais. A unidade de área é bastante recorrente entre os profissionais do mercado imobiliário e da construção civil, facilitando a incorporação da Pegada Ecológica nas políticas públicas voltadas para o setor.

A descrição detalhada dos métodos de Pegada Ecológica, *ReCiPe* e demanda de energia acumulada foi tratada por Hischier *et al.* (2010).

3.1.5 Tratamento dos dados

No exemplo de aplicação do método, o cadastramento arquitetônico da edificação existente, assim como o modelo da nova construção, são realizados em um programa de *Building Information Modelling* (BIM). A utilização do BIM não é, entretanto, mandatória. Dos modelos BIM são extraídos para planilhas eletrônicas os dados de entrada e saída de materiais para o inventário de ciclo de vida dos casos comparados (caso base, reabilitação com eficiência energética e nova edificação teórica).

A modelagem do inventário e as análises impacto de ciclo de vida de cada um dos cenários comparados são realizadas com apoio do *SimaPro* (PRÉ CONSULTANTS, 2012), ferramenta computacional que combina bases de dados para inventários de ciclo de vida e modelos de avaliação de impacto de ciclo de vida. Todos os cálculos de caracterização das cargas ambientais no inventário de ciclo de vida são efetuados com suporte do *SimaPro*, assim como a

agregação dos resultados da análise de impacto de ciclo de vida. Outras ferramentas podem ser empregadas, desde que possibilitem a realização de análises de ciclo de vida detalhadas ao nível dos materiais e contemplem o rol mínimo de categorias de impacto de ciclo de vida previstos neste método. Ressalva-se, porém, que o uso de ferramentas diferentes pode levar a resultados ligeiramente divergentes (BRUNO; KATRIEN, 2005; IEA ANNEX 31, 2004a).

As equações 1 a 5 detalhadas a seguir expressam como foram modelados no *SimaPro* cada uma das etapas do ciclo de vida de cada um dos casos nos cenários comparados. Os efeitos ambientais do cenário com reabilitação, de acordo com a categoria ou agrupamento de categorias de impacto avaliadas, são definidos pela Equação 1. A unidade de cada um dos termos da equação 1, assim como as seguintes, é relacionada à unidade da categoria de impacto e de dano que estiver sendo avaliado, conforme detalhadas no item 3.1.4.

$$EA_{re} = EOI_{re} + EM_{re} + EO_{re} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

EA_{re} são os efeitos ambientais totais do cenário com reabilitação;

EOI_{re} são os efeitos da obra inicial da reabilitação;

EM_{re} são os efeitos de manutenção do cenário com reabilitação;

EO_{re} são os efeitos de utilização da edificação reabilitada.

Os efeitos ambientais do cenário com nova construção, por categoria ou agrupamento de categorias de impacto, são dados pela Equação 2.

$$EA_{nc} = EOI_{nc} + EM_{nc} + EO_{nc} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

EA_{nc} são os efeitos ambientais totais do cenário com nova construção;

EOI_{nc} são os efeitos da obra inicial da nova construção;

EM_{nc} são os efeitos de manutenção do cenário com nova construção;

EO_{nc} são os efeitos de utilização da nova construção.

Os efeitos da obra inicial do cenário com reabilitação, em cada categoria ou agrupamento de categorias de impacto, são definidos pela Equação 3.

$$EOI_{re} = EFV_{dp} + EI_{re} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

EOI_{re} são os efeitos ambientais da obra inicial de reabilitação;

EFV_{dp} são os efeitos de final de vida das demolições parciais do cenário com reabilitação;

EI_{re} são os efeitos incorporados nos materiais utilizados nas obras de reabilitação.

De maneira análoga, os efeitos da obra inicial do cenário com nova construção, em cada categoria ou agrupamento de categorias de impacto, são dados pela Equação 4.

$$EOI_{nc} = EFV_{dt} + EI_{nc} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

EOI_{nc} são os efeitos ambientais da obra inicial da nova construção;

EFV_{dt} são os efeitos de final de vida da demolição total da edificação existente;

EI_{re} são os efeitos incorporados nos materiais utilizados na nova construção.

Os efeitos de manutenção de cada edificação, tanto no cenário com reabilitação quanto no cenário com nova construção, para cada categoria ou agrupamento de categorias de impacto, resultam da Equação 5. Para evitar a dupla contagem, na Equação 5 não deve ser considerada a primeira vida útil dos componentes e materiais introduzidos na obra inicial, em ambos os cenários. Assim, a relação vida de serviço da edificação / vida útil do componente deve ser subtraída em uma unidade, e será igual a zero nos casos em que a vida útil do componente é maior ou igual à vida de serviço da edificação.

$$EM = \sum_{i=1}^n \left[EI_{ci} \times \left(\frac{VS_{ed}}{VU_{ci}} \right) \right] + \sum_{i=1}^n \left[EFV_{ci} \times \left(\frac{VS_{ed}}{VU_{ci}} \right) \right] \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

EM são os efeitos de manutenção;

EI_{ci} são os efeitos incorporados nos materiais de cada componente substituível ou manutenível da edificação;

EFV_{ci} são os efeitos de final de vida de cada componente substituído ou reparado da edificação;

VU_{ci} é a vida útil de cada componente substituível ou manutenível da edificação;

VS_{ed} é a vida de serviço definida na unidade funcional para a edificação.

Na fase de utilização das edificações são computados, em ambos os cenários, para cada categoria ou agrupamento de categorias de impacto, os efeitos relacionados ao uso de energia para operação da edificação, de acordo com a Equação 6.

$$EO = O_{ed} \times VS_{ed} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

EO são os efeitos ambientais de operação da edificação;

O_{ed} são os efeitos ambientais relacionados ao consumo anual de energia para operação da edificação;

VS_{ed} é a vida de serviço definida na unidade funcional para a edificação.

Na Tabela 3.3 está sumarizada a sequência de procedimentos para a realização do inventário e entrada no *SimaPro* de cada uma das etapas do ciclo de vida analisado para o exemplo de aplicação do método: 1) efeitos de final de vida dos materiais resultantes das demolições seletivas (no cenário com reabilitação) e da demolição total (no cenário com nova construção); 2) efeitos incorporados nos materiais para a execução das obras de reabilitação (no cenário com reabilitação) ou de construção (no cenário com nova construção) e manutenção em ambos os cenários; e 3) utilização das edificações.

Tabela 3.3 – Sequência de procedimentos para elaboração do inventário e modelagem no *SimaPro* de cada uma das etapas do ciclo de vida das edificações comparadas

Casos →		Edificação existente - restauro	Reabilitação com eficiência energética	Nova edificação teórica
Procedimentos ↓		↓	Fontes dos dados ↓	↓
Ciclo de vida	Efeitos de final de vida	Quantitativos de materiais	Extraídos do modelo BIM	Extraídos do modelo BIM
		Composições	TCPO de época	TCPO de época
		Cargas ambientais	Base <i>ecoinvent</i>	Base <i>ecoinvent</i>
	Efeitos incorporados	Quantitativos de materiais	Extraídos do modelo BIM	Extraídos do modelo BIM
		Composições	TCPO atual	TCPO atual
		Cargas ambientais	Base <i>ecoinvent</i>	Base <i>ecoinvent</i>
	Efeitos de uso	Energia para operação	Simulação <i>EnergyPlus</i>	Simulação <i>EnergyPlus</i>
		Cargas ambientais	Base <i>ecoinvent</i>	Base <i>ecoinvent</i>

Os resultados da avaliação de impacto de ciclo de vida para a obra inicial, a manutenção e a operação ao longo da vida de serviço de cada um dos casos dos cenários comparados são exportados do *SimaPro* e tratados em planilha eletrônica.

3.2 AVALIAÇÃO PELO PAINEL DE ESPECIALISTAS

Conforme antecipada, a participação do painel de especialistas não se dá a título de confirmação de decisões, mas sim de avaliação subjetiva da qualidade das premissas e pressupostos adotados e da identificação de possíveis melhorias ao método proposto, tal qual apontado por Pinheiro *et al.* (2013).

Os conceitos e premissas adotados no modelo conceitual foram submetidos à avaliação de um grupo de especialistas, que responderam a questionário composto de 18 questões. Algumas das questões foram elaboradas aos pares: a primeira questão apresenta ao especialista diferentes soluções para um determinado problema identificadas na análise documental; o segundo par da questão expunha a disposição inicialmente adotada no modelo conceitual proposto, interrogando o especialista se este a considerava correta ou não e solicitando-o a comentar. Este procedimento possibilita um *feedback* imediato entre especialista-realizador-especialista, reduzindo o número de iterações necessárias de forma a não comprometer a realização da pesquisa ou a participação dos especialistas no painel. Para as questões definidas sem o suporte de múltiplas possibilidades encontradas na análise documental, foi submetida à consideração dos especialistas apenas a disposição adotada no modelo conceitual. As definições do modelo conceitual provenientes de normas, regulamentos e métodos já validados não integraram a avaliação pelo painel de especialistas.

No Apêndice A deste trabalho encontra-se o modelo do questionário aplicado e no Apêndice B a qualificação dos especialistas que compuseram o painel.

Nos questionários, foram propostas questões que avaliavam os quesitos do modelo conceitual listados na Tabela 3.4. A seleção dos especialistas para a composição do painel levou em conta as principais áreas de conhecimento abrangidas pelos quesitos elencados acima, consolidados na Tabela 3.5.

Tabela 3.4 – Quesitos do modelo conceitual avaliados pelo painel de especialistas e questões correspondentes no questionário proposto aos especialistas

Quesito avaliado	Questões
1. Modelagem dos cenários para a comparação	
a) Determinação da matriz de comparação	1 e 2
b) Definição do cenário com reabilitação	8 e 9
c) Definição do cenário com nova construção	10, 11 e 12
2. Modelagem do escopo da análise de ciclo de vida	
a) Determinação das características de desempenho e definição da unidade funcional	3, 4, 9 e 11
b) Delimitação da fronteira do sistema, inclusive omissões de processos e estágios do ciclo de vida	5, 6 e 7
3. Modelagem do inventário de ciclo de vida	
a) Estimativa das composições e quantitativos de materiais	14, 15, 16
b) Estimativa do consumo de energia para operação	13
4. Métodos de avaliação de impacto de ciclo de vida	
a) Adequação dos indicadores utilizados aos objetivos do trabalho	17
b) Compreensão dos indicadores utilizados pelos profissionais do setor da construção civil	18

Tabela 3.5 – Composição do painel de especialistas

Área de atuação do especialista	Quesito(s)
Conservação do patrimônio edificado	1.a; 2.a; 2.b; 4.a; 4.b
Arquitetura e sustentabilidade ambiental	1.a; 1.b; 1.c; 2.a; 2.b; 4.a; 4.b
Projeto arquitetônico (prática de mercado)	1.b; 1.c; 2.a; 4.a; 4.b
Planejamento urbano	1.b; 1.c; 2.a; 4.a; 4.b
Estimação/orçamentação de obras	2.a; 3.a; 4.a; 4.b
Simulação termoenergética de edificações	2.a; 3.b; 4.a; 4.b
Análise de ciclo de vida (geral)	1.a; 1.b; 1.c; 4.a; 4.b
Análise de ciclo de vida (edificações)	Todos
Empresário do ramo da construção civil	1.b; 2.a; 2.b; 3.a; 4.a; 4.b

A correlação quesito *versus* especialista expressa na Tabela 3.5 não implica que o especialista tenha sido inquirido somente em relação ao(s) quesito(s) respectivo(s), mas apenas e tão somente a relação entre os quesitos elencados e a área de conhecimento do especialista. Todos os especialistas consultados responderam ao mesmo questionário e foi-lhes colocada a opção de não responder às questões que não diziam respeito à sua especialidade ou experiência profissional. Contudo, todos os especialistas selecionados possuem formação em nível de graduação ou pós-graduação em arquitetura e urbanismo, engenharia civil, de materiais, de energia ou de meio ambiente, possuindo, portanto, conhecimentos suficientes para compreender e avaliar o trabalho como um todo.

As respostas dos questionários e as opiniões emitidas pelos especialistas foram analisadas criticamente em função dos objetivos do estudo e são discutidas no capítulo 4. As conclusões obtidas a partir do painel de especialistas foram empregadas na realização do teste exemplo do modelo conceitual, cujo resultado é apresentado no capítulo 5 sob a forma de um exemplo de aplicação do procedimento de avaliação da viabilidade ambiental da reabilitação.

3.3 SELEÇÃO DA EDIFICAÇÃO PARA O EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO MÉTODO

Para este estudo foi selecionado um edifício institucional público. O procedimento aqui proposto pode ser estendido a outras arquiteturas comerciais, de serviços e públicas, ressaltando-se que outros valores patrimoniais levam a diferentes critérios de intervenção e princípios de preservação. Optou-se por uma edificação do último período da arquitetura modernista (os anos 1950 e 1960) em Florianópolis: o Edifício das Diretorias. O objetivo foi de aprofundar-se nos aspectos relativos à reabilitação de edifícios do passado recente – em especial as de viés modernista –, posto que sua preservação, de forma geral, justifica-se com base no valor de uso. A edificação também consta no cadastro do IPHAN-SC (ver ANEXO A), o que sinaliza o interesse governamental em sua preservação. A edificação selecionada possui pavimento tipo estruturado em planta livre, o que facilita, de antemão, qualquer necessidade de alteração de uso. Maiores detalhes sobre a

caracterização da edificação foram obtidos a partir de pesquisa documental no arquivo do Departamento Estadual de Infraestrutura – DEINFRA/SC, órgão do Governo do Estado de Santa Catarina que atualmente ocupa o edifício e levantamento *in situ*, e são apresentados no capítulo 5.

4 AVALIAÇÃO DO MODELO CONCEITUAL POR PAINEL DE ESPECIALISTAS

Foi convidado a responder o questionário um especialista para cada área proposta para a composição do painel de especialistas. O especialista da área de planejamento urbano foi convidado *a posteriori* tendo em vista as questões que foram levantadas pelos demais especialistas sobre as consequências urbanísticas das premissas adotadas para a definição do cenário com nova construção e para a delimitação das fronteiras do sistema. Um dos especialistas, impossibilitado de participar do painel, sugeriu o nome de um colega para responder ao questionário. Outro especialista não respondeu ao convite para a participação no painel. Assim, foram onze os especialistas convidados, sendo que nove efetivamente responderam aos questionários.

As respostas dos especialistas ao questionário foram tabuladas de acordo com quesitos propostos e, após análise crítica, são discutidas nos itens a seguir à luz dos conceitos e pressupostos obtidos na revisão da literatura. Com o intuito de preservar a opinião dos especialistas, suas respostas ao questionário são tratadas de forma indireta ou transcritas diretamente, mas de forma anônima. As afirmações entre aspas são referentes às respostas aos questionários.

4.1 MODELAGEM DOS CENÁRIOS PARA A COMPARAÇÃO

O primeiro quesito proposto para avaliação no questionário submetido aos especialistas tratava da modelagem dos cenários para a comparação na análise de ciclo de vida. Os especialistas responderam questões que abordavam a determinação da matriz de comparação e a definição do cenário com reabilitação e do cenário com nova construção.

4.1.1 Determinação da matriz de comparação

Quando questionados se a abordagem do impacto ambiental evitado era adequada para se avaliar a viabilidade ambiental da reabilitação de edificações existentes – ou seja, que a reabilitação evitaria a construção de uma nova edificação –, a maioria dos especialistas

concordou com a proposição. Apenas os especialistas com alguma formação ou experiência na área de conservação do patrimônio questionaram a premissa. Esses preferiram a abordagem que considera que a reabilitação conservaria os recursos e a energia já investidos na construção da edificação existente e argumentaram sobre a perda de materiais insubstituíveis, memória etc. Entretanto, o objetivo do método é avaliar apenas e tão somente as questões ambientais da reabilitação e se ela é viável – ou seja, preocupa-se com aquilo que se ganha ou que se perde no tempo presente e futuro. Outros aspectos, como a significância do patrimônio, podem e devem ser avaliados por outros métodos, conforme já tratado na revisão da literatura. Ao responderem se o conceito de impacto ambiental evitado fora incorporado de forma adequada na matriz de comparação, nenhum dos especialistas discordou. Contudo, foram levantados questionamentos sobre o potencial de reciclagem do entulho proveniente da demolição da edificação existente. A questão da destinação dos materiais no final de vida das edificações foi abordada no quesito que questionou os especialistas sobre a modelagem do inventário de ciclo de vida e será retomada mais à frente neste capítulo.

4.1.2 Definição do cenário com reabilitação

O modelo proposto para o cenário com reabilitação foi aceito pela maioria dos especialistas. A única resposta inesperada partiu de dois especialistas que, teoricamente, não advogariam pela conservação do patrimônio: argumentaram que a redução no consumo de energia e respectivas consequências ambientais não justificaria a realização de intervenções no envoltório de edificações de valor cultural e interesse para preservação. Apenas um especialista discordou do pressuposto que o edifício existente possa ser readequado aos padrões de desempenho, conforto e segurança atuais.

4.1.3 Definição do cenário com nova construção

A proposta de definição do cenário com nova construção resultou em opiniões divididas entre os especialistas. A maior parte dos especialistas considerou apropriada a adoção do próprio edifício existente, readequado aos padrões e técnicas construtivas atuais,

como referência para o modelo da nova construção. Por outro lado, refutaram a possibilidade da utilização de um arquétipo elaborado de acordo com dados estatísticos do parque edilício de edificações de mesma categoria de uso do edifício existente, argumentando que “o arquétipo não representa edifícios novos”.

Na sequência, os especialistas foram questionados sobre a proposição de um modelo teórico de edificação que combina as duas alternativas: um arquétipo para representar a nova construção, com área construída, projeção e número de pavimentos idênticos ao da edificação existente, complementado com parâmetros construtivos que representam a média da prática construtiva atual para edificações da mesma categoria. Esses parâmetros construtivos seriam modificados apenas para adequar o arquétipo ao nível de eficiência energética mais elevado no sistema brasileiro de etiquetagem de edificações (MME, 2011). Desta forma, ter-se-ia como referência o desempenho almejado em instrumento regulatório para construções novas. Apenas um especialista discordou da proposição, mas alguns especialistas não deixaram de lembrar que “a média da prática construtiva atual [...] é um parâmetro que pode não representar adequadamente o potencial de uma nova edificação, mesmo com adequações para eficiência energética”, sendo “importante no arquétipo considerar práticas de construção nova, e não a média dos edifícios existentes”. Mas, diante das múltiplas possibilidades arquitetônicas, de sistemas construtivos e de materiais, o quê define uma “nova edificação”? A intenção inicial de se incorporar no modelo da nova construção a média da prática construtiva foi mantida na proposta, com a ressalva de que seja utilizada como referência uma amostra de edificações de construção bastante recente.

Também foi sugerido no painel que “a substituição da edificação pode acarretar em uma melhor utilização do espaço urbano, reduzindo a necessidade de novas edificações e infraestrutura em outros locais (no caso da possibilidade de aumento da área construída)”. Essa argumentação foi intencionalmente instigada na própria redação do questionário. Foi apontado que a utilização da mesma configuração da edificação existente (área construída, projeção e número de pavimentos) poderia levantar questionamentos quanto à possibilidade de as leis urbanísticas

vigentes para o terreno possibilitarem a edificação de uma área construída bem maior. Um dos especialistas argumentou que “também o contrário acontece. Muitas vezes, manter a edificação existente e adequá-la arquitetonicamente [...] poderá resultar em mais área construída do que demolir e construir nos padrões urbanísticos permitidos”. Adotou-se o princípio de que aquela possível área construída excedente advém de reais demandas sociais, econômicas ou mesmo especulativas e, portanto, de uma forma ou de outra, seria edificada em outro lugar. Ou seja, os efeitos ambientais decorrentes da construção da estrutura necessária para suprir essa área útil não seriam poupados com a reabilitação. Esta lógica perpassa outros instrumentos urbanos brasileiros, como o mecanismo de transferência do direito de construir. Previsto no Estatuto das Cidades (BRASIL, 2001), a transferência do direito de construir possibilita transferir para outro terreno o potencial construtivo de terrenos com restrições para construção, como aqueles ocupados por edificações de interesse para preservação.

4.2 MODELAGEM DO ESCOPO DA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA

Com base nas resoluções tomadas a partir do painel de especialistas, o escopo da análise de ciclo de vida do método proposto ficou definido de acordo com os itens a seguir.

4.2.1 Determinação das características de desempenho e definição da unidade funcional

A definição de padrões de desempenho, conforto e segurança idênticos para a edificação reabilitada e para a nova construção já foi abordada no item 4.1.2 e foi ponto pacífico no painel de especialistas. Entretanto, como já era esperado pela polêmica que o tema encerra, naquilo que diz respeito ao tempo de vida útil as opiniões dos especialistas foram divididas. Apenas dois dos especialistas não reduziram a questão da vida útil da edificação a aspectos de durabilidade de materiais. O fim da vida de uma edificação raramente é resultado da sua decrepitude ou deterioração da construção, como um todo ou de suas partes. Há uma série de outros fatores endógenos e exógenos que decretam a obsolescência da construção (argumento levantado por um dos especialistas) e também depende de seu valor social e econômico e

de questões culturais (ponto defendido pelo segundo especialista). De fato, como já foi abordado na revisão da literatura, pesquisas realizadas não encontraram relação entre a durabilidade prevista para diferentes tipos de construção e a longevidade das edificações (TRUSTY; ARGELES, 2005). Dado o desconhecimento de estudos regionalizados e que abordem esses aspectos, a determinação da vida útil na definição da unidade funcional em análises de ciclo de vida de edificações acaba sendo uma decisão estritamente discricionária. A título de padronização de procedimentos, no método proposto foi definida a NBR 15575-1 (ABNT, 2013) como referência para a determinação do período de vida útil das edificações na unidade funcional da análise de ciclo de vida. Registra-se aqui a sugestão de realização de pesquisas futuras sobre a vida útil das edificações no Brasil considerando aspectos outros que não apenas a durabilidade de materiais.

Por outro lado, a questão da durabilidade dos materiais é pertinente para determinar a rotina de manutenção programada dos componentes da edificação ao longo de sua vida útil. Mesmo nesse aspecto, quase metade dos especialistas não considerou a NBR 15575-1 suficiente. Esta constatação reforça a necessidade da realização de análises de sensibilidade no escopo da análise de ciclo de vida de edificações, variando-se não só as entradas e saídas de material para manutenção na fase de uso das edificações, como também o período de vida útil.

4.2.2 Delimitação da fronteira do sistema, inclusive omissões de processos e estágios do ciclo de vida

Apenas um dos especialistas respondeu não concordar com a delimitação da fronteira do sistema proposta, o qual não engloba o fim de vida da edificação reabilitada e da nova construção e considera que o estágio de uso possa ser renovado continuamente com reabilitações consecutivas. Porém, a análise das respostas dos especialistas a este quesito resultou em duas reconsiderações importantes no modelo conceitual proposto.

Foi exposto no texto do questionário que não existem estatísticas confiáveis quanto ao percentual de resíduos de construção e demolição que recebe destinação regular e quanto é reciclado; e que

no estado-da-arte considera-se que o aproveitamento dos materiais potencialmente recicláveis deve ser contabilizado no ciclo de vida do novo produto onde esses materiais forem empregados, quando e se isto vier a ocorrer. Ainda assim, quase metade dos especialistas insistiu no potencial de reciclagem dos resíduos da demolição da edificação existente. Entretanto, o especialista que fora convidado ao painel para abordar justamente esse quesito, confirmou que o “reaproveitamento de resíduos sólidos de edificações no país ainda é muito incipiente”. Por fim, acatou-se que o potencial de reciclagem da demolição da edificação seja considerado, mas desde que os resíduos sejam reaproveitados na obra da edificação do cenário com nova construção, ou seja, no escopo da mesma análise de ciclo de vida. Assim, não se contraria o estado-da-arte nesse assunto, e atende-se a preocupação dos especialistas consultados de que seja estimulada a reciclagem de resíduos de construção.

Ainda na discussão deste assunto no painel de especialistas, havia o entendimento inicial deste autor de que os impactos ambientais gerados pela destinação dos resíduos prejudicariam o cenário com nova construção na comparação, contrariando o princípio do impacto ambiental evitado. Afinal, por conta da demolição da edificação existente, o cenário com nova construção gera uma quantidade maior de entulho. Entretanto, o especialista em análise de ciclo de vida no painel foi categórico ao afirmar que o princípio do impacto ambiental evitado não seria contrariado já que, no geral, poderiam ser evitados impactos ambientais consequenciais. Por fim, o ciclo de vida dos materiais de construção pode se alongar por décadas, acrescentando o problema das previsões de desenvolvimento tecnológico na equação de sua destinação final. Dessa forma, optou-se de considerar no método proposto somente as cargas ambientais relacionadas às demolições, ao transporte dos resíduos até uma central de triagem ou outra estrutura do gênero e a disposição em aterro. Se por um lado espera-se que as vias de eliminação de materiais de construção no Brasil melhorem nos próximos anos, por outro lado uma das finalidades da análise de ciclo de vida é estimular o desenvolvimento de tecnologias ambientalmente mais eficientes e não faria sentido já incluí-las na avaliação. Assim, na análise de ciclo de vida os materiais não são vinculados a nenhum cenário de tratamento de resíduos (exceto no caso de reciclagem na própria nova construção, como tratado

acima). Essa definição foi incorporada no exemplo de aplicação do método.

Retomando alguns aspectos já tratados no item 4.1.3, a proposição de considerar nas fronteiras do sistema somente a edificação em si e seu uso e ocupação, sem incluir as alterações marginais como, por exemplo, a necessidade de novas áreas de estacionamento, foi questionada por alguns dos especialistas. Esta premissa desconsideraria “outras variáveis, como [...] a infraestrutura urbana, esta relacionada com conceitos e reflexões sobre a densidade e intensidade em contextos urbanos”. Entretanto, esta relação edificação *versus* infraestrutura seria melhor objeto de estudo de análises de ciclo de vida consecutivas e que abrangessem em suas fronteiras um contexto urbano – para a tomada de decisão em escala –, e não somente a avaliação de uma edificação. Considerando que o objetivo do método proposto é de avaliar a viabilidade ambiental da reabilitação de edificações tomadas isoladamente, manteve-se o pressuposto tomado de Erlandsson e Levin (2005), de não incluir nas fronteiras do sistema as atividades marginais (*background*) – como alterações na estrutura urbana, tráfego de usuários etc. Segundo os autores, desde que mantida a função da edificação, essas atividades não sofreriam a interferência de diferentes alternativas de construção.

4.3 MODELAGEM DO INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA

4.3.1 Estimativa das composições e quantitativos de materiais

Na avaliação deste quesito, não houve discordância quando a proposta de utilização de tabelas padronizadas de composições de materiais e serviços para a construção civil, como as TCPO, para quantificar de maneira expedita os materiais envolvidos na análise de ciclo de vida dos modelos. Algumas ressalvas, apenas, de que sempre que possível sejam utilizados dados primários e específicos ou oriundos de levantamento realizado por pessoal especializado.

A maioria dos especialistas também concordou com a utilização de bases de dados internacionais – como o *ecoinvent* – no inventário de ciclo de vida, dada a inexistência, até o momento, de uma base de dados brasileira. Alertou-se, entretanto, para as possíveis

imprecisões desse procedimento diante das diferenças tecnológicas e, inclusive, diante da grande variação encontrada em processos já estudados no Brasil. A sugestão do painel foi de simplificar a análise considerando apenas os materiais mais importantes. No exemplo de aplicação do método, apenas os insumos principais das composições extraídas das TCPO foram vinculados aos processos da base de dados utilizada (no caso, o *ecoinvent* v. 2.2). De qualquer forma, o método proposto é flexível quanto à base de dados, podendo incorporar, no futuro, dados brasileiros, como foi inclusive sugerido por alguns dos especialistas. O desenvolvimento de inventários de ciclo de vida setoriais para a indústria brasileira está previsto no plano de ação do Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida (MDIC/CONMETRO, 2010, 2012). Quando disponibilizada, a base de dados brasileira poderá ser incorporada no procedimento.

4.3.2 Estimativa do consumo de energia para operação

Com relação à estimativa do consumo de energia para operação, a maioria dos especialistas considerou adequado o método proposto, que envolve a utilização de programas computacionais de simulação termoenergética de edificações. Neste quesito, um dos especialistas apenas argumentou que considera suficiente “a utilização de métodos prescritivos [...], desde que com precisão aferida e aceitável”. Outro especialista demonstrou preocupação que “a utilização de programas complexos de simulação pode acarretar em dificuldades na aplicação do método e uma limitação ainda maior de pessoas habilitadas na utilização do mesmo”. Em momento anterior, o mesmo especialista já havia defendido que “apesar desta ferramenta [o método proposto] ser destinada ao uso por especialistas, a facilidade no uso deve ser suficiente para justificar a adoção do método, dispensando assim o dispêndio de tempo na elaboração dos projetos”.

4.4 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA

4.4.1 Adequação dos indicadores utilizados aos objetivos do trabalho

Neste quesito, foi solicitado aos especialistas indicar quais os métodos de avaliação de impacto de ciclo de vida e respectivos

indicadores eles julgavam mais adequados, dentre aqueles propostos para utilização no procedimento – demanda energética acumulada; *ReCiPe midpoint*; *ReCiPe endpoint* e pegada ecológica. Também foi solicitado aos especialistas que indicassem se eram familiarizados ou não com as categorias de impacto avaliadas em cada método.

O resultado dessa avaliação foi um tanto inesperado: a maioria dos especialistas indicou o método *ReCiPe midpoint* como o mais adequado, mas muitos indicaram não ter familiaridade com várias das 18 categorias de impacto consideradas no método. Ao mesmo tempo, quase todos os especialistas declararam-se familiarizados com as três categorias de impacto abrangidas pelo método *ReCiPe endpoint*, o segundo método na ordem de preferência. Outro resultado inesperado, uma vez que as categorias de impacto do *ReCiPe endpoint* nada mais são que a agregação de categorias do *ReCiPe midpoint* a partir de fatores de caracterização. Essa constatação alerta para a importância que tem a forma de comunicação dos resultados em uma análise de ciclo de vida.

Outro resultado inesperado ficou por conta do desconhecimento em relação ao método Pegada Ecológica, uma vez que utiliza um indicador baseado em unidade de área e cujo conceito é relativamente midiático, difundido por instituições como o Fundo Mundial para a Natureza (*WWF – World Wide Fund for Nature*, ver <http://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/especiais/pegada_ecologica/>). Nesse caso, entretanto, o nível de familiaridade com o método coincidiu com a rejeição à sua adequação ao método proposto que, de fato – embora não por isso – é procedente. Huijbregts *et al.* (2008) discutiram as limitações do modelo da Pegada Ecológica na avaliação dos impactos ambientais relacionados a produtos da construção civil. Os autores calcularam a pegada ecológica de 2.630 produtos e compararam com os resultados do *Ecoindicator 99*, um método de avaliação de impacto de ciclo de vida mais sofisticado. Comparando os resultados em cada um dos dois métodos, concluíram que a pegada ecológica é um indicador que deve ser empregado com certas restrições para produtos com alta intensidade de recursos minerais e que envolvem processos com grande emissão de metais e particulados, como aqueles da indústria da construção civil.

O único resultado esperado neste quesito foi o nível de familiaridade com o conceito de demanda energética acumulada (100%), embora não tenha sido o primeiro na ordem de preferência.

4.4.2 Compreensão dos indicadores utilizados

No último quesito, foi questionado aos especialistas se os indicadores avaliados pelos quatro métodos de avaliação de impacto de ciclo de vida seriam de razoável compreensão pelos profissionais de arquitetura, engenharia e construção e passíveis de serem incorporados em políticas públicas para o setor da construção civil. Ou, ainda, se seria o caso de representá-las sob a forma de pontuações únicas (ainda que as normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006 não admitam ponderações em análises de ciclo de vida comparativas). A despeito das respostas ao quesito anterior, quatro dos especialistas – a maioria – consideraram os indicadores passíveis de serem incorporados em políticas públicas, ainda que sejam de difícil compreensão.

A proposição de uma pontuação única foi refutada, pois “considera questões subjetivas” e criaria “problemas em situações onde os dados estão muito próximos dos limites”. Um dos especialistas sugeriu uma etapa de normalização. No método proposto, os resultados de cada categoria de impacto analisada dos casos do cenário com reabilitação são normalizados em termos percentuais em relação aos impactos ambientais totais da categoria correspondente no cenário com nova construção.

4.5 SÍNTESE DO PAINEL DE ESPECIALISTAS

De forma geral, a avaliação do modelo conceitual pelo painel de especialistas foi positiva. A maior parte das premissas foi confirmada pelos especialistas, as limitações do método foram apontadas e algumas alterações foram introduzidas. O painel frisou as limitações em relação ao referencial utilizado para a determinação da vida útil das edificações e às bases de dados para o inventário de ciclo de vida. Estas questões podem ser reavaliadas futuramente com a realização de outras pesquisas e estudos que extrapolam os objetivos e as possibilidades deste trabalho. As

limitações concernentes à utilização das TCPO devem ser levadas em conta quando da aplicação do método, e seu emprego deve ser reavaliado de acordo com os resultados das análises de sensibilidade nos quantitativos de materiais dos inventários de ciclo de vida. Das proposições do painel, uma das alterações propostas e já realizada no exemplo de aplicação do método foi a de simplificar a análise de ciclo de vida incluindo no inventário apenas os principais componentes construtivos. Outra alteração incluída no método proposto foi quanto às cargas ambientais de final de vida proveniente das demolições, que não foram vinculadas a cenário de tratamentos de resíduos. Também foi incorporada a sugestão de que o potencial de reciclagem da demolição da edificação seja considerado, mas somente desde que os resíduos sejam reaproveitados no cenário com nova construção da mesma análise de ciclo de vida. Contudo, essa alternativa não foi ensaiada quando da realização do exemplo de aplicação do método. Por razões de limite de tempo, as possibilidades de reciclagem de resíduos de demolição e os processos nelas envolvidos não foram contemplados no recorte da revisão da literatura. Por fim, também incorporou-se no método uma etapa de normalização dos resultados da análise de ciclo de vida, propondo-se o cenário com nova construção como referencial da normalização.

5 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO MÉTODO DE AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE AMBIENTAL DA REABILITAÇÃO

Situado no núcleo fundador de Florianópolis – e até hoje o centro comercial e institucional da cidade –, o Edifício das Diretorias (Figura 5.1) está entre os primeiros “arranha-céus” da capital catarinense. O projeto de 1953 do eng. Domingos Trindade foi a edificação selecionada para servir de exemplo de aplicação e de base para o desenvolvimento do método proposto.



Figura 5.1 – Fachadas noroeste e sudoeste do Edifício das Diretorias.
Foto: Ariadne Marques de Mendonça.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO EXISTENTE

O Edifício das Diretorias possui 8.822,28 m² de área construída, distribuídos entre subsolo, térreo, 10 pavimentos tipo e ático (ou 11º pavimento), conforme disposto na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Áreas e usos do Edifício das Diretorias

Categoria	Área (m²)	Uso
Subsolo	516,55	Depósitos, subestação, apoio
Térreo	516,55	Hall, escritórios
Pavimento Tipo	10 x 738,79	Escritórios
11º Pavimento	401,28	Escritórios, auditório

A sua estrutura é em concreto armado e independente das vedações. A organização espacial de duas alas em “L” concentra as circulações verticais, áreas molhadas e hall dos elevadores na parte interna do vértice, deixando livre o restante das lajes para a ocupação de escritórios (Figura 5.2). A Figura 5.3 ilustra as plantas baixas do térreo e dos pavimentos tipo do edifício. O pé-direito é de 3,00 m nos pavimentos tipo, 4,30 m no térreo e 5,60 m sob os pilotis. O edifício apresenta ainda um subsolo semienterrado, também com pé-direito de 3,00 m. Na Figura 5.4 está representada uma perspectiva axonométrica do edifício, com uma secção para exibir sua estrutura.



Figura 5.2 – Área de escritórios do Edifício das Diretorias.

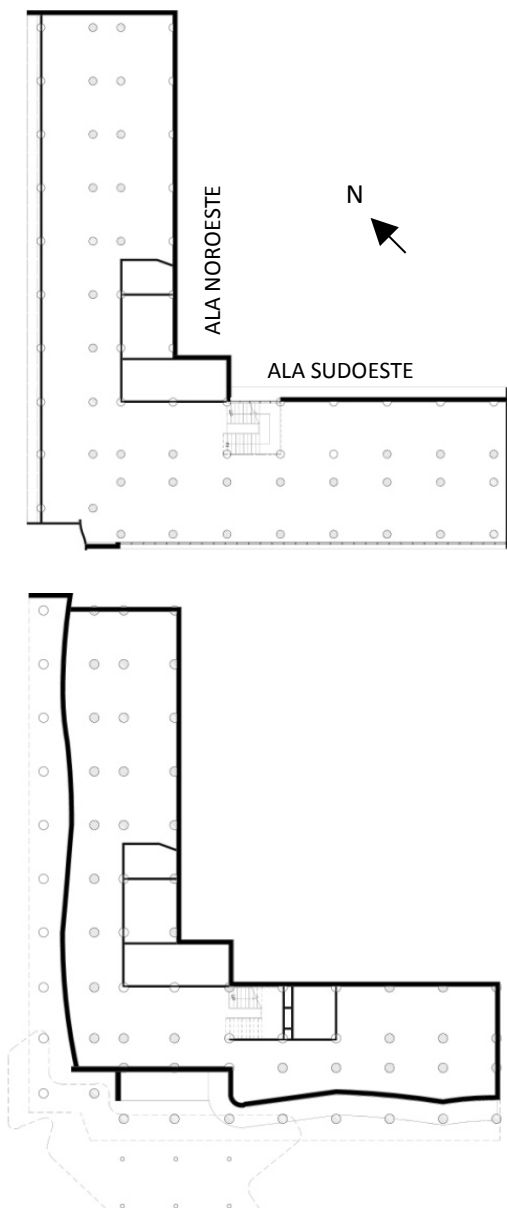


Figura 5.3 – Planta baixa do pavimento tipo e térreo do Edifício das Diretorias.

Desenho: Tiago Tamanini Jr.

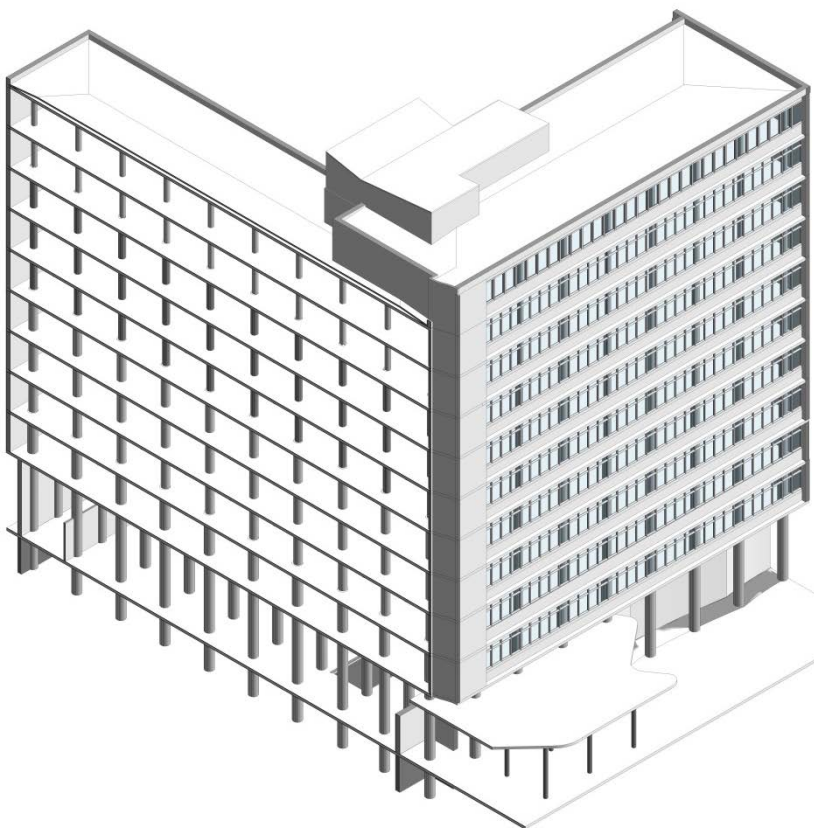


Figura 5.4 – Perspectiva axonométrica do Edifício das Diretorias.

Desenho: Tiago Tamanini Jr.

Quanto ao envoltório, as duas fachadas mais estreitas são empenas cegas, enquanto as janelas nas fachadas mais extensas formam bandas únicas horizontais. O percentual de aberturas nas fachadas total é de 32,82%. As esquadrias atuais são em alumínio. Não aparentam serem originais, já se apresentam bastante desgastadas e não oferecem boa vedação. Os vidros são simples, incolores, de 4 mm. Em relação à cobertura, as lajes do 10º e do 11º pavimento são protegidas por telhas de fibrocimento. Excetuando a parede noroeste sob os pilotis, revestida em pedra natural, todas as demais

paredes do edifício são rebocadas e pintadas. Externamente, as paredes são pintadas nas tonalidades amarelo médio e azul claro. Na elevação noroeste uma proteção solar em formato de grelha de 30 cm de profundidade em concreto armado funciona como *brise-soleil*, auxiliando no sombreamento de toda a fachada.

A característica construtiva mais marcante do envoltório do Edifício das Diretorias reside nas alvenarias das vedações externas: paredes a meia vez, com fiadas intercaladas de blocos cerâmicos de oito furos assentados na maior dimensão e blocos de quatro furos assentados em duas fileiras (Figura 5.5). O resultado é uma parede com mais de 30 cm.



Figura 5.5 – Detalhe das paredes externas do Edifício das Diretorias.

Foto: Tiago Tamanini Júnior.

Para a elaboração do cadastramento arquitetônico, foram utilizadas plantas do projeto arquitetônico datadas de 1953; do projeto estrutural do ano de 1955; de levantamento arquitetônico de 1976; e arquivos em *CAD* de levantamentos de 2003, 2006 e 2007. Todo o material consta do arquivo do DEINFRA/SC. O cadastramento foi atualizado com levantamento *in situ*.

Em seguida, a edificação foi modelada na plataforma *Building Information Modelling* (BIM) da Autodesk, o *Revit Architectural 2013* em sua versão educacional. O modelo construído na plataforma BIM

foi então exportado para o software *OpenStudio*. Na modelagem do *OpenStudio*, foram separadas as zonas térmicas do modelo para a simulação de acordo com a configuração real do edifício: uma zona única para a ala noroeste, outra para a ala sudoeste e uma terceira, esta a única não condicionada, no centro do edifício, que reúne as circulações verticais. Os demais parâmetros necessários para a simulação termoeenergética da edificação, como as propriedades termofísicas dos materiais, foram modeladas diretamente no *EnergyPlus*. A Tabela 5.2 apresenta os principais parâmetros geométricos do envoltório do modelo do edifício existente.

Tabela 5.2 – Parâmetros geométricos do envoltório do edifício existente

Parâmetro	Valor
Área total construída	8.822,28 m ²
Área útil interna total (referente às zonas térmicas)	8.706,32 m ²
Área total condicionada	6.435,08 m ²
Área de projeção do edifício	751,00 m ²
Área de projeção da cobertura	695,00 m ²
Área do envoltório	6.615,03 m ²
Volume total da edificação	26.700,50 m ³

Embora no projeto original do edifício estejam representadas paredes com 28 cm de espessura, verificou-se *in situ* que as paredes externas possuíam em média de 32 cm de espessura. No modelo para simulação, o ajuste da espessura foi distribuído entre os rebocos interno e externo. A absorvância solar das paredes foi medida *in situ* com espectrofotômetro, obtendo-se os valores de absorvância média total de 71,3% (paredes pintadas em azul) e 58,8% (paredes pintadas em amarelo antigo). Para a absorvância térmica foi adotado o valor de 90% para ambas as cores, sugerido pela NBR 15220 (ABNT, 2005). A transmitância térmica das paredes foi calculada em 1,7 W/m².K, também de acordo com a NBR 15220. Para a cobertura, a absorvância solar foi definida em 80%, a absorvância térmica em 90% e a transmitância térmica calculada em 2,6 W/m².K. O tipo de vidro empregado na simulação do Edifício das Diretorias foi o incolor simples, com espessura de 4 mm e Fator

Solar 0,87. As propriedades termofísicas dos demais materiais e componentes construtivos foram obtidas com base na NBR 15220 (ABNT, 2005). Considerando que não houve grandes evoluções nos sistemas construtivos desde o Movimento Moderno, os materiais apresentados no Anexo B da Parte 2 da norma se aplicam, inclusive, às edificações daquele período. A Tabela 5.3 apresenta as características termofísicas do envoltório opaco do edifício existente.

Tabela 5.3 – Características construtivas do edifício existente

	Componente	Espessura (m)	Condutividade (W/m.K)	Densidade (kg/m ³)	Calor específico (J/kg.K)
Piso térreo	Revestimento em granilite/mármore	0,010	3,00	2600	840
	Argamassa de regularização	0,050	1,15	2000	1000
	Laje maciça em concreto	0,150	1,75	2400	1000
Entrepiso	Revestimento em madeira	0,019	0,15	600	1340
	Argamassa de regularização	0,050	1,15	2000	1000
	Laje maciça em concreto	0,125	1,75	2200	1000
	Argamassa de reboco (forro)	0,025	1,15	2000	1150
Paredes	Argamassa de reboco externa	0,050	1,15	2000	1000
	Bloco cerâmico 8 furos deitado (ext)	0,220	0,9	1600	920
	Bloco cerâmico 8 furos espelho (int)	0,110	0,9	1600	920
	Argamassa de reboco interna	0,050	1,15	2000	1000
Cobertura	Telha em fibrocimento	0,008	0,95	1900	840
	Laje maciça em concreto	0,100	1,75	2200	1000
	Argamassa de reboco (forro)	0,025	1,15	2000	1150

5.2 CENÁRIOS PARA COMPARAÇÃO

5.2.1 Caso base – restauro do edifício existente

O caso base foi modelado a partir do levantamento do edifício existente, restaurado de forma a possibilitar uma nova vida de serviço de acordo com as características de desempenho definidas para a análise de ciclo de vida. Posto que o edifício existente deva ser readequado aos padrões de desempenho e de conforto atuais, as instalações prediais e os equipamentos funcionais (inclusive de ar-condicionado) foram tratados como obsoletos e considerou-se sua substituição no momento da reabilitação. Isso possibilita que o edifício existente e a nova construção sejam comparados com equipamentos de mesma eficiência.

O Edifício das Diretorias encontra-se bastante preservado em suas características originais. A partir de inspeções visuais nas áreas cujo acesso foi autorizado pela administração do edifício, constatou-se que de forma geral seus elementos e componentes construtivos encontram-se em bom estado de conservação. Os problemas de degradação existentes são pontuais e devidos às falhas na manutenção e à proximidade do final de sua vida útil. A Superintendência do IPHAN em Santa Catarina considera como bom estado de conservação aqueles elementos ou componentes que apresentam um percentual de degradação entre 0% e 20%. Tomando o princípio do impacto ambiental evitado, adotou-se a situação que menos favorecesse o cenário com reabilitação. Assim, o limite superior de 20% foi utilizado para definir o nível de intervenções de restauro consideradas para a estrutura em concreto armado, alvenarias, estrutura de cobertura, pisos, revestimentos de paredes, portas internas e elementos de sombreamento. A proteção solar da fachada NO passou por obras de restauração após a realização do levantamento do edifício. Entretanto, na análise de ciclo de vida considerou-se seu estado anterior à intervenção de restauro. O nível de intervenção em cada um dos componentes foi objeto de variação nas análises de sensibilidade, discutido à frente. As telhas em fibrocimento e as esquadrias das aberturas externas já são bastante antigas e apresentam problemas de funcionamento. Considerou-se, portanto, a substituição total desses elementos. A

pintura das paredes externas e internas e das portas internas também foi considerada para 100% da área. A Tabela 5.4 sumariza os serviços de restauro considerados na análise de ciclo de vida, bem como os percentuais de intervenção empregados na obra inicial de reabilitação e nas manutenções ao longo da vida de serviço da edificação.

Tabela 5.4 – Serviços considerados no restauro do edifício existente e percentual de intervenção

Elemento	Serviço	Intervenção
Estrutura	Recuperação de estrutura em concreto	20%
Alvenarias	Demolições parciais	20%
	Re-execução de alvenarias	20%
Cobertura	Substituição das telhas	100%
	Reparos na estrutura em madeira	20%
Pisos	Restauro do piso em granilite	20%
	Restauro do piso em mármore	20%
	Substituição do piso cerâmico	20%
	Restauro do piso em madeira	20%
Revestimentos	Restauro de rebocos	20%
	Pintura	100%
	Restauro de revestimentos em pedra	20%
Aberturas	Substituição das esquadrias	100%
	Substituição dos vidros	100%
Portas	Substituição de portas em madeira	20%
	Pintura de portas em madeira	100%
Brises	Recuperação de estrutura em concreto	20%
	Pintura	100%

5.2.2 Caso reabilitação com eficiência energética

Para a reabilitação com foco na eficiência energética, o modelo do edifício existente foi modificado, incluindo medidas de conservação de energia para reduzir o consumo de eletricidade com o sistema de condicionamento de ar. O objetivo, portanto, foi minimizar os ganhos de calor pelo envoltório do edifício. Quatro princípios foram considerados: redução da absorção solar de paredes e cobertura; aumento do isolamento térmico da cobertura; redução do fator solar das áreas envidraçadas; e o sombreamento das aberturas.

Foram propostas, então, intervenções no edifício envolvendo a pintura das fachadas e da cobertura com cores de menor absorvência, a substituição do telhado, a substituição das janelas e a instalação de brise-soleils. As medidas de conservação de energia simuladas no *EnergyPlus* em cada um dos componentes do envoltório – paredes, cobertura, aberturas e elementos de sombreamento – constam da Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Medidas de conservação de energia a serem simuladas no caso reabilitação com eficiência energética

Elemento	Medida de conservação de energia
Paredes	1 Pintura na cor branca
Cobertura	2 Pintura branca sobre cobertura existente
	3 Substituição das telhas existentes por telhas metálicas termoacústicas
Aberturas	4 Aplicação de película de controle solar sobre os vidros existentes
	5 Substituição das esquadrias existentes por esquadrias com vidros laminados
	6 Substituição das esquadrias existentes por esquadrias com vidros duplos
Brises	7 Instalação de aletas na fachada NE
	8 Instalação de aletas de alumínio na proteção solar da fachada NO

Para a pintura branca das fachadas, foi adotada a absorvência solar de 13%, enquanto que para a pintura branca da cobertura considerou-se a absorvência de 29%. A cobertura da edificação com as telhas metálicas termoacústicas (com 4 cm de poliestireno expandido) teve sua transmitância térmica calculada em 0,68 W/m².K, incluindo a câmara de ar e a laje em concreto existente. As propriedades ópticas dos vidros simulados nas medidas de conservação 4, 5 e 6 constam da Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Propriedades ópticas dos vidros

Propriedades	Vidro + película	Vidro laminado	Vidro Duplo	
Espessura (mm)	3,00	8,00	6,00 + 6,00	
Espessura da câmara de ar (mm)	-	-	12,00	
Gás da câmara de ar	-	-	Ar	
Transmissão à radiação solar para a incidência normal	0,21	0,31	0,38	0,72
Refletância a radiação solar para incidência normal (face externa)	0,26	0,38	0,30	0,09
Refletância a radiação solar para incidência normal (face interna)	0,26	0,25	0,45	0,09
Transmitância a luz visível para incidência normal	0,24	0,62	0,76	0,86
Refletância a luz visível para incidência normal (face externa)	0,29	0,11	0,06	0,09
Refletância a luz visível para incidência normal (face interna)	0,28	0,11	0,05	0,09
Transmitância a radiação infravermelha	0	0	0	0
Emissividade hemisférica a radiação infravermelha (face externa)	0,84	0,84	0,84	0,84
Emissividade hemisférica a radiação infravermelha (face interna)	0,84	0,84	0,038	0,20
Condutividade térmica (W/m-K)	1,00	0,49	0,99	1,00

Os resultados das simulações foram analisados e as intervenções individuais que obtiveram reduções no consumo de energia inferiores a 1% foram descartadas, conforme o critério de corte estabelecido para a análise de ciclo de vida. As restantes, foram combinadas entre si e avaliadas, por meio de simulações paramétricas no *EnergyPlus*, quanto à economia de energia proporcionada.

5.2.3 Caso nova edificação teórica

A nova edificação teórica, baseada no edifício de referência de nível “A” de eficiência pelo método da simulação do RTQ-C (MDIC/INMETRO, 2010), utiliza a mesma geometria do edifício existente. Entretanto, é subtraída de todos os elementos de sombreamento e o percentual de abertura nas fachadas total foi reduzido para 17%, distribuído proporcionalmente de acordo com a área de aberturas em cada orientação do edifício existente. As propriedades termofísicas dos componentes construtivos empregados atendem os limites estabelecidos para a Zona Bioclimática 3. O vidro empregado foi do tipo simples, 3 mm de espessura, com fator solar de 0,87, conforme prescrição do RTQ-C (MDIC/INMETRO, 2010).

Para definição da nova edificação teórica, o edifício de referência do RTQ-C foi modificado de forma que os materiais e tecnologias empregados refletissem o padrão construtivo atual da região do edifício existente. Como referência, foi utilizada a tipologia predominante de edifício comercial de grande altura da área central de Florianópolis, definida a partir do levantamento das características construtivas de 18 edificações construídas entre 2004 e 2012 (TAMANINI JUNIOR, 2013). A cobertura, entretanto, precisou ser modificada para atender os pré-requisitos de absortância e transmitância do RTQ-C para a zona bioclimática em estudo. Na Tabela 5.7 estão descritas as demais características construtivas da nova edificação teórica, seguidas dos dados que serão necessários para a realização das simulações termoenergéticas.

Tabela 5.7 – Características construtivas da nova edificação teórica

	Componente	Espessura (m)	Condutividade (W/m.K)	Densidade (kg/m³)	Calor específico (J/kg.K)
Piso	Piso cerâmico	0,008	1,05	2000	920
	Argamassa de regularização	0,050	1,15	2000	1000
	Laje maciça em concreto	0,125	1,75	2200	1000
Entreposto	Piso cerâmico	0,008	1,05	2000	920
	Argamassa de regularização	0,050	1,15	2000	1000
	Laje maciça em concreto	0,125	1,75	2200	1000
	Argamassa de reboco (forro)	0,025	1,15	2000	1150
Paredes	Revestimento cerâmico (exterior)	0,008	1,05	2000	920
	Argamassa de reboco	0,050	1,15	2000	1000
	Bloco cerâmico 8 furos espelho	0,110	0,9	1600	920
	Argamassa de reboco	0,050	1,15	2000	1000
Cobertura	Telha fibrocimento + pintura branca*	0,008	0,95	1900	840
	Poliestireno extrudado*	0,030	0,035	40	1420
	Laje maciça em concreto	0,125	1,75	2200	1000
	Argamassa de reboco (forro)	0,025	1,15	2000	1150

* Modificação em relação à tipologia predominante (TAMANINI JUNIOR, 2013) para atender ao pré-requisito do RTQ-C de absorância solar e de transmitância térmica da cobertura para a para a zona bioclimática 3 (MDIC/INMETRO, 2010).

Para quantificar as entradas e saídas de material na manutenção da nova edificação teórica ao longo da vida de serviço, foi utilizado o mesmo princípio empregado para a edificação existente: 20% de intervenção nos componentes manuteníveis e 100% nos

substituíveis. Na Tabela 5.8 estão listados os serviços considerados na análise de ciclo de vida, bem como os percentuais de intervenção empregados nas manutenções ao longo da vida de serviço do cenário com nova construção.

Tabela 5.8 – Serviços e percentual de intervenção nas obras de manutenção considerados na nova edificação teórica

Elemento	Serviço	Intervenção
Estrutura*	Recuperação de estrutura em concreto	20%
Alvenarias	Demolições parciais	20%
	Re-execução de alvenarias	20%
Cobertura	Pintura das telhas	100%
	Substituição das telhas	100%
	Reparos na estrutura em madeira	20%
	Substituição do isolamento térmico	100%
Pisos	Recuperação do contrapiso	20%
	Substituição do piso cerâmico	100%
Revestimentos	Recuperação de rebocos	20%
	Pintura	100%
	Substituição da cerâmica das fachadas	100%
Aberturas	Substituição das esquadrias	100%
	Substituição dos vidros	100%
Portas	Substituição de portas em madeira	20%
	Pintura de portas em madeira	100%

* Considerado apenas na análise de sensibilidade em que se variou para maior o período da vida de serviço da edificação.

5.3 OBJETIVO E ESCOPO DA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA

5.3.1 Função

A função considerada para a edificação reabilitada e para a nova construção é prover espaço interno para o funcionamento de escritórios de finalidade comercial, de serviços e/ou públicos – incluindo ambientes com funções subordinadas, como áreas comuns, de circulação e de apoio –; proporcionando condições de conforto térmico ao longo de uma vida de serviço de 60 anos. A temperatura de conforto dentro dos ambientes é garantida por sistema de condicionamento artificial de ar.

5.3.2 Características de desempenho

Conforme o estabelecido no RTQ-C e atendendo a equivalência de função e desempenho exigidos em análises de ciclo de vida comparativas, todos os casos foram avaliados com padrões de uso e de ocupação, densidades de cargas internas e faixas de temperatura do ar interno idênticas. Na definição do caso restauro do edifício existente, considerou-se que todas as instalações prediais e equipamentos funcionais³ seriam substituídos quando da reabilitação da edificação existente. Assim, assume-se a premissa de que os novos sistemas instalados no cenário com reabilitação e no cenário com nova construção sejam análogos.

Os modelos foram simulados com sistema de condicionamento artificial de ar (ligado apenas durante o período de ocupação), sendo este o padrão predominante nos novos edifícios de escritórios em Florianópolis. Como sistema de condicionamento de ar, foi utilizado o objeto *Packaged Terminal Air Conditioner* do *EnergyPlus*, com COP 3,4. A taxa de renovação de ar foi estabelecida em 27m³/pessoa, com uma infiltração de ar constante de 0,4 trocas de ar por hora. O sistema de condicionamento de ar foi simulado de forma que, quando a temperatura interna dos ambientes estivesse acima de 25,5°C no verão, ele seria acionado automaticamente. No inverno, o equipamento seria acionado em temperaturas acima de 23,5°C. Não foi considerado o sistema de aquecimento nos ambientes, uma vez que a utilização de calefação não é um hábito difundido na região. Durante as visitas ao edifício, constatou-se existência apenas de aparelhos de resfriamento.

As *schedules* de ocupação e operação e as cargas internas utilizadas foram aquelas identificadas por Santana (2006) como sendo predominantes nos edifícios comerciais da cidade de Florianópolis.

³ Instalações prediais: cabeamentos, tubulações e demais componentes (aparelhos, registros, válvulas, caixas de passagem etc.) de instalações hidrossanitárias, de gás, de combate a incêndio, de águas pluviais, elétricas e outras. Equipamentos funcionais: equipamentos de recalque, pressurização, aquecimento de água, condicionamento de ar, filtragem, combate a incêndio, maquinário de circulação vertical, iluminação, entre outros.

Entretanto, no que diz respeito à iluminação, os modelos elaborados para a comparação foram simulados com uma densidade de potência de iluminação instalada da ordem de 9,7 W/m². Este é o limite máximo aceitável de densidade de potência de iluminação para o nível de eficiência “A” de edificações, definido pelo método da área do edifício do RTQ-C (MDIC/INMETRO, 2010).

A densidade de ocupação e as cargas internas empregadas nas simulações constam da Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Cargas internas empregadas nas simulações no *EnergyPlus*

Item	Especificação	Valor	Referência
Ocupação média (m ² /pessoa)	Usuários	14,7	(SANTANA, 2006)
Carga interna (W/pessoa)	Atividade*	135,0	(ANSI/ASHRAE, 2010)
Carga interna (W/m ²)	Iluminação	9,7	(MDIC/INMETRO, 2010)
	Equipamentos	9,7	(SANTANA, 2006)

* Adulto médio (1,8 m² de superfície de pele) em atividade intermitente de escritório: 50% do tempo digitando; 25% do tempo manuseando documentos sentado; e 25% do tempo caminhando (75,0 W/m²).

A vida de serviço das edificações foi determinada de acordo com a vida útil de projeto para renovação de alta qualidade de edifícios públicos definida na NBR 15575-1: mínimo de 60 anos (ABNT, 2013). A vida útil de cada um dos sistemas e componentes manuteníveis e substituíveis das edificações foi definida de acordo com a mesma norma, sendo empregado sempre o limite superior (HIRSCHFELD, 2000), conforme estabelecido na Tabela 5.10. A exceção ficou por conta da pintura externa, para a qual foi adotado o limite inferior dado o ambiente agressivo da região onde se localiza o edifício.

Tabela 5.10 – Vida útil de projeto dos sistemas

Sistema	Vida útil de projeto (anos)
Estrutura principal	≥60
Vedação externa	≥60
Vedação interna	≥30
Cobertura – estrutura	≥30
Cobertura – telhas	≥20
Pisos internos	≥20
Revestimento interno aderido	≥20
Revestimento de fachada aderido e não aderido	≥30
Esquadrias externas	≥30
Esquadrias internas	≥12
Pintura interna	≥4
Pintura externa	≥8

5.3.3 Unidade funcional

A unidade funcional do exemplo de aplicação do método será 1 (uma) vida de serviço de edifício de escritórios a ser estabelecida em área já edificada, através de sua reabilitação ou demolição seguida de nova construção de área útil equivalente. A edificação deverá manter suas capacidades funcionais e desempenho até seu próximo ciclo de vida de serviço, reiniciado com nova intervenção de reabilitação, após um período de 60 anos de utilização.

5.3.4 Fronteiras do sistema

5.3.4.1 Estágios do ciclo de vida das edificações

De acordo com os itens 3.1.2.4 e 3.1.2.5 definidos no método, em cada um dos cenários comparados no teste do modelo conceitual foram considerados os estágios do ciclo de vida e os processos relacionados na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Estágios do ciclo de vida e processos considerados na análise de ciclo de vida dos cenários comparados

Estágio do ciclo de vida		Cenário com reabilitação		Cenário com nova construção
		Caso base - restauro	Reabilitação com eficiência energética	Nova edificação teórica
01 vida de serviço de edifício de escritórios em área já edificada	Reabilitação ou nova construção	Disposição	Materiais provenientes das demolições parciais das obras de restauração do edifício existente	Materiais provenientes das demolições parciais das obras de restauração do edifício existente
		Obras iniciais	Materiais e respectiva energia incorporada para restauração e medidas de conservação de energia no edifício existente	Materiais e respectiva energia incorporada para construção da nova edificação
		Operação	Consumo de energia pelo edifício restaurado durante 60 anos	Consumo de energia pelo edifício reabilitado durante 60 anos
	Utilização	Manutenção	Reposição dos componentes manuteníveis ao longo de 60 anos	Reposição dos componentes manuteníveis ao longo de 60 anos
		Disposição	Materiais dos componentes substituídos na manutenção do edifício restaurado	Materiais dos componentes substituídos na manutenção da nova edificação teórica

Nos efeitos incorporados abrangidos pelas obras de reabilitação, de nova construção e de manutenção (inclusive as demolições) foram excluídos do escopo os custos indiretos (instalação do canteiro, serviços e utilização de equipamentos nas obras, administração,

mobilização e desmobilização). No estágio de utilização do ciclo de vida das edificações foram contabilizados os efeitos ambientais relacionados ao consumo de energia para operação dos sistemas de condicionamento de ar, de iluminação e de equipamentos. Uma vez que o padrão de uso e de ocupação são os mesmos em todos os casos comparados, as entradas e saídas relacionadas à “manutenção rotineira” das edificações durante a fase de utilização – por exemplo, os serviços de limpeza – foram excluídos da comparação. Os modelos comparados possuem área construída similar e abrigam a mesma função. Assim, considera-se que não haveria diferenças significativas nessas atividades. Conforme definido no método, o aproveitamento dos materiais potencialmente recicláveis resultantes das demolições deve ser contabilizado no ciclo de vida da sua próxima utilização. Assim, todos os materiais resultantes da demolição e da restauração do edifício existente, assim como de sua manutenção e também da nova edificação teórica, serão encaminhados para disposição final.

5.3.4.2 *Destinação de resíduos de demolição*

Conforme discutido no item 4.2.2 do painel de especialistas foi definido que os resíduos das demolições realizadas ao longo do ciclo de vida dos cenários comparados seriam encaminhados para disposição final. O aterro de resíduos de construção mais próximo, com licença ambiental para receber grandes quantidades de material, localiza-se em Alto Aririú, no município de Palhoça. O aterro é gerido pela Aecer (Associação das Empresas de Coleta e Entulho), associação que reúne 15 empresas do setor de coleta de resíduos de construção e demolição da Grande Florianópolis. Os materiais inservíveis para o aterro, como gesso, ferro, vidro e madeira, são separados e destinados adequadamente pela Aecer, entretanto, esses processos não foram incluídos nas fronteiras do sistema. Foi considerado que todos os resíduos seriam encaminhados para o aterro licenciado. O aterro da Aecer localiza-se a aproximadamente 25 km do edifício existente. Esta distância foi utilizada para modificar ou incluir os respectivos valores nos processos “*disposal, building*”, “*disposal*” e “*disposal, inert material*” da base *ecoinvent 2.2*.

5.3.4.3 Sistemas, componentes e elementos construtivos considerados

A partir da sugestão do painel de especialistas discutida no item 4.3.1, em cada um dos casos comparados foram consideradas as entradas e saídas de matéria e energia relacionadas aos principais materiais referentes aos seguintes sistemas das edificações:

- Estrutura principal (pilares, vigas, lajes etc.);
- Estrutura auxiliar (escadas, rampas e outras estruturas para circulação vertical);
- Vedações externas;
- Vedações internas (exceto divisórias leves);
- Cobertura (estrutura, impermeabilizações, isolamento térmico, telhamento);
- Pisos;
- Revestimentos;
- Aberturas externas;
- Portas internas;
- Apêndices externos (elementos de sombreamento, marquises, platibandas).

Dado que não foi possível obter-se informações detalhadas quanto à profundidade das fundações do edifício existente, este sistema foi excluído do ciclo de vida de todos os casos comparados, sendo considerado apenas o baldrame.

Conforme fora estabelecido no item 5.4.2, foi considerada a substituição total das instalações prediais e dos equipamentos funcionais no cenário com reabilitação. A disposição final desses componentes suprimidos do edifício existente, assim como os efeitos incorporados das novas instalações e equipamentos se faz presente em ambos os cenários da comparação. Portanto, as respectivas entradas e saídas foram excluídas do escopo da análise de ciclo de vida.

5.4 INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA

5.4.1 Consumo de energia para operação

Para estimar o consumo de energia para a operação de cada um dos casos avaliados, foi realizada simulação computacional termoenergética no *EnergyPlus V8.0.0* (CRAWLEY; LAWRIE, 2000; CRAWLEY, 2001) empregando os parâmetros de ocupação, cargas internas e sistema de ar-condicionado especificados no item 5.4.2. As características construtivas e as propriedades termofísicas dos componentes do envoltório do edifício existente e da nova edificação teórica, empregadas nas simulações, estão especificadas nas Tabelas 5.3 e 5.7, respectivamente. As modificações inseridas no modelo da simulação do edifício existente para o caso reabilitação com eficiência energética foram listadas na Tabela 5.5.

A divisão das zonas térmicas dos modelos das simulações dos casos comparados – duas zonas condicionadas e uma não condicionada por andar – é apresentada esquematicamente na Figura 5.6.

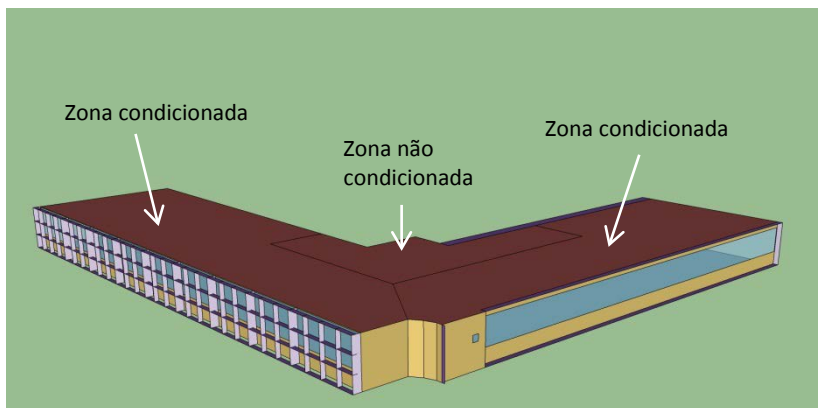


Figura 5.6 – Representação esquemática das zonas térmicas dos modelos simulados.

Nas simulações, foi utilizado o arquivo climático da cidade de localização da edificação existente, Florianópolis – latitude 27,7° S e longitude 48,5° W, a uma altitude de referência de 7m –, em formato TRY (EPW), disponibilizado pelo LabEEE/UFSC (CARLO;

LAMBERTS, 2005). O clima de Florianópolis é definido como mesotérmico úmido na classificação de Köppen, com temperaturas altas no verão e moderadas no inverno. De acordo com a NBR 15220 (ABNT, 2005), a cidade localiza-se na zona 3 do zoneamento bioclimático brasileiro.

Os consumos anuais de energia para operação registrados pela simulação de cada um dos casos é apresentado na sequência.

5.4.1.1 *Caso base – restauro do edifício existente*

Na Figura 5.7 é representado o modelo geométrico do edifício existente utilizado na simulação termoenergética. Para reduzir o número de cálculos efetuados pelo programa de simulação, o pavimento tipo aparece modelado apenas uma vez.

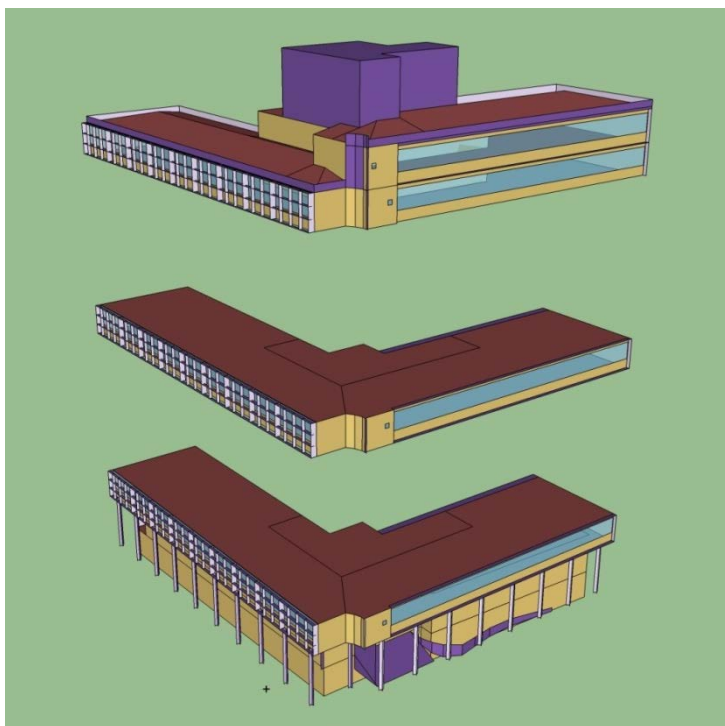


Figura 5.7 – Modelo geométrico da simulação termoenergética do edifício existente

A partir da simulação no *EnergyPlus*, obteve-se os valores de consumo de energia mensal e anual expressos na Tabela 5.12, separados por uso final de sistemas elétricos.

Tabela 5.12 – Consumo anual de energia elétrica do edifício existente

Uso final	Consumo anual (kWh)	Consumo por área (kWh/m ²)	Participação (%)
Iluminação	178.721,73	20,53	30,4
Equipamentos elétricos	276.556,14	31,76	47,0
Condicionamento de ar	132.987,50	15,27	22,6
Total	588.265,37	67,57	100,0

A título de referência, a média do consumo de energia elétrica faturado para o edifício entre 2009 e 2012 foi de 603.504,00 kWh (a ausência de dados de alguns meses no período foi preenchida pela média dos meses respectivos nos outros anos), uma diferença da ordem de 2,5% para o consumo simulado. Como este estudo limita-se às intervenções no envoltório da edificação, o impacto das medidas de conservação de energia será observado apenas no consumo de energia elétrica pelo sistema de condicionamento de ar, ou seja, na parcela de 22,6% do consumo anual de energia do edifício.

1.1.1.1 Caso reabilitação com eficiência energética

A avaliação de cada uma das medidas de conservação de energia propostas para o caso reabilitação com eficiência energética, já apresentadas na Tabela 5.5, levou à elaboração de oito arquétipos para a simulação termoenérgica (modelos 1 a 8). Apenas as medidas de conservação de energia 7 e 8 introduzem modificações na geometria do modelo do edifício existente, as quais aparecem representadas na Figura 5.8 e na Figura 5.9, respectivamente. Não tendo atingido o critério de corte de 1% de redução no consumo de energia, as intervenções na cobertura e o brise da fachada NE foram excluídas da etapa seguinte de simulação, que envolve a combinação de medidas de conservação de energia.

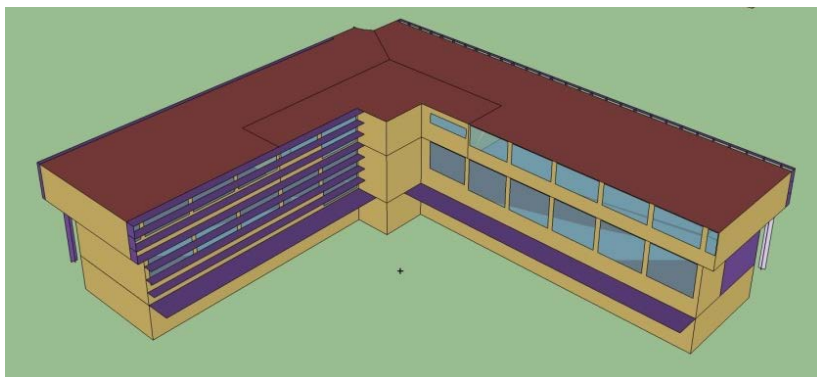


Figura 5.8 – Brise da fachada NE adicionado ao modelo da simulação do caso reabilitação com eficiência energética.

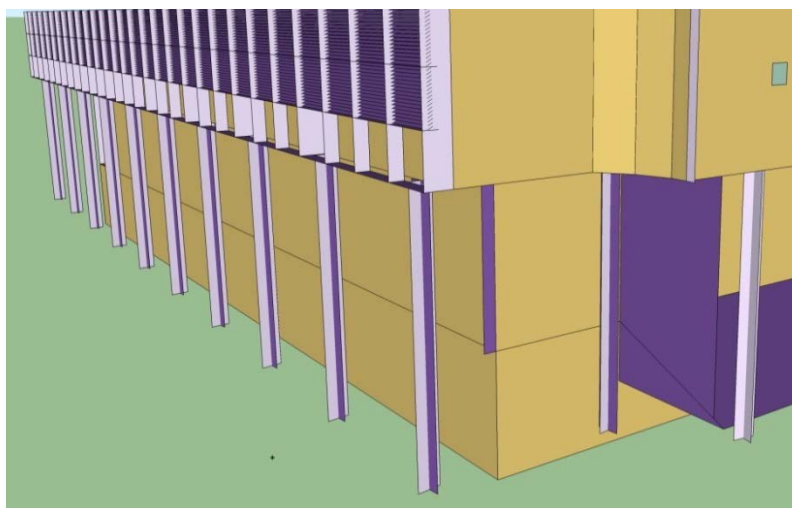


Figura 5.9 – Aletas adicionadas à proteção solar da fachada NO no modelo da simulação do caso reabilitação com eficiência energética.

As medidas de conservação de energia que proporcionaram mais de 1% de redução no consumo de energia definiram 10 combinações (modelos 9 a 18) que foram submetidas à simulação termoenergética. Os consumos de energia resultantes, bem como seu percentual de redução em relação ao caso base constam da Tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Consumo anual de energia elétrica dos modelos simulados no caso reabilitação com eficiência energética e respectiva redução no consumo em relação ao caso base

Modelo	Medidas de conservação de energia	Consumo anual de energia (kWh)	Redução (%)
1	Pintura das paredes na cor branca	578.227,98	-1,7
2	Pintura da cobertura existente na cor branca	588.219,05	0,0
3	Substituição das telhas existentes	588.273,47	0,0
4	Película nos vidros existentes	577.896,66	-1,8
5	Novas esquadrias com vidros laminados	571.100,60	-2,9
6	Novas esquadrias com vidros duplos	577.205,78	-1,9
7	Instalação de brises de alumínio na fachada NE	585.338,99	-0,5
8	Instalação de aletas de alumínio no brise da fachada NO	575.138,92	-2,2
9	Pintura das paredes + Película vidros	568.600,79	-3,3
10	Pintura das paredes + Vidros laminados	563.538,13	-4,2
11	Pintura das paredes + Vidros duplos	566.810,20	-3,6
12	Película nos vidros + Brise NO	566.396,68	-3,7
13	Vidros laminados + Brise NO	561.828,33	-4,5
14	Vidros duplos + Brise NO	562.222,82	-4,4
15	Pintura das paredes + Brise NO	565.611,08	-3,8
16	Pintura das paredes + Película nos vidros + Brise NO	557.502,30	-5,2
17	Pintura das paredes + Vidros laminados + Brise NO	553.004,14	-6,0
18	Pintura das paredes + Vidros duplos + Brise NO	552.274,93	-6,1

5.4.1.2 Caso nova edificação teórica

O modelo da nova edificação teórica, representado geometricamente na Figura 5.10, registrou os consumos de energia expressos na Tabela 5.14.

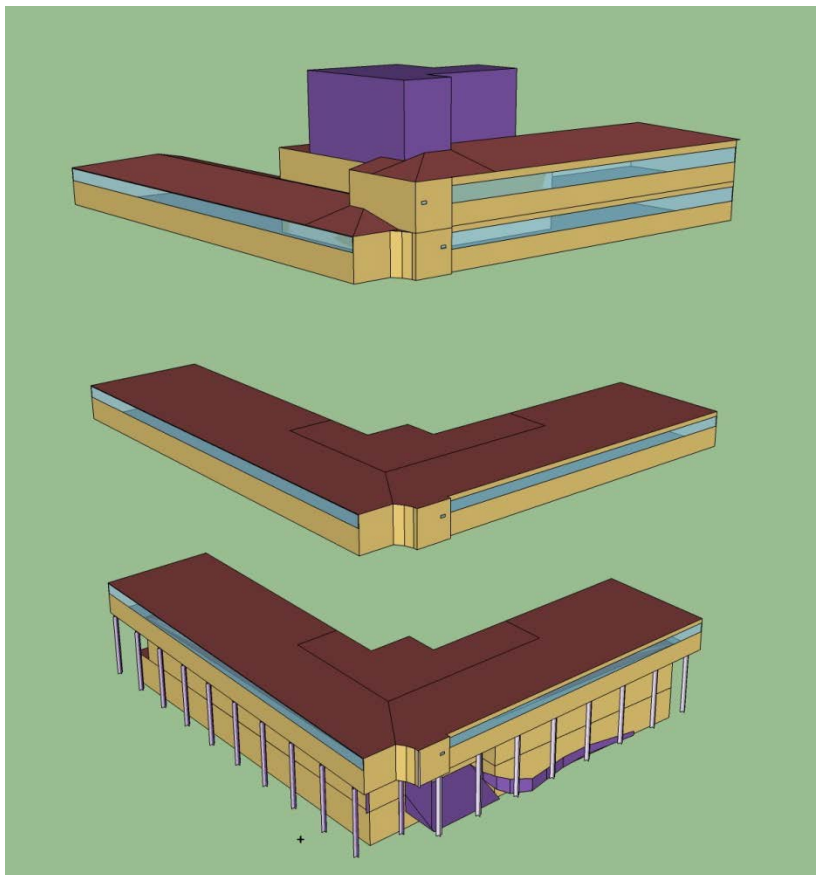


Figura 5.10 – Modelo geométrico da simulação termoenergética do caso nova edificação teórica

Tabela 5.14 – Consumo anual de energia elétrica do modelo da nova edificação teórica

Uso final	Consumo anual (kWh)	Consumo por área (kWh/m ²)	Participação (%)
Iluminação	178.721,73	20,53	31,6
Equipamentos elétricos	276.556,14	31,76	48,9
Condicionamento de ar	110.444,35	12,69	19,5
Total	565.722,23	64,98	100,0

O modelo da nova edificação teórica registrou um consumo anual de energia 3,8% menor que aquele simulado para o edifício existente restaurado, o caso base. Como pode ser observado na Figura 5.11, somente os modelos 10, 13, 14, 15, 16, 17 e 18 do caso reabilitação com eficiência energética consumiriam menos eletricidade que a nova edificação.

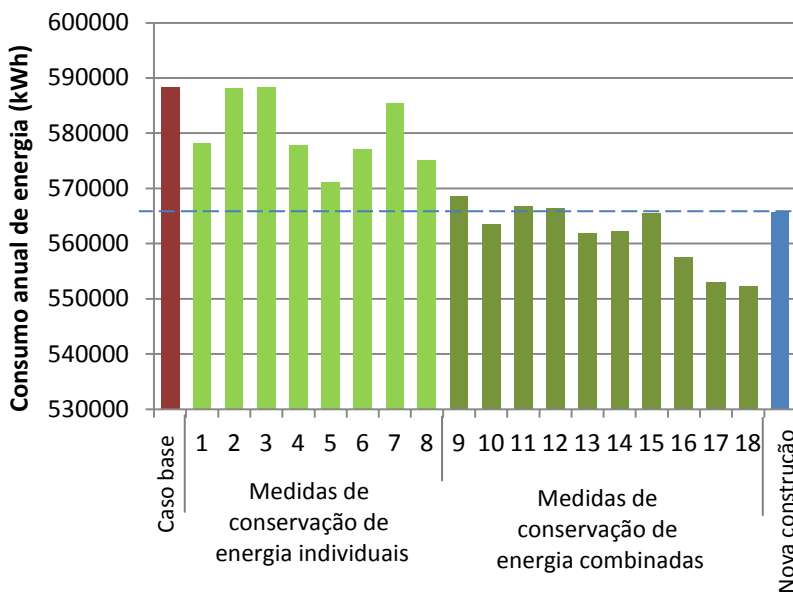


Figura 5.11 – Comparativo do consumo anual de energia dos casos simulados.

5.4.2 Composições e Materiais

Considerando que o Edifício das Diretorias foi construído entre as décadas de 1950-1960, as composições de seus componentes construtivos para a quantificação dos materiais envolvidos nas demolições foram estimadas com base na TCPO 2 (TCPO, 1961). As tabelas atuais utilizadas nas intervenções de restauro, de reabilitação e no cenário com nova construção foram as da TCPO 13 (TCPO, 2010).

Após definidas as composições e levantados os quantitativos, cada um dos materiais foi correlacionado ao respectivo processo da base de dados *ecoinvent* v.2.2 (ALTHAUS; DOKA; DONES; HECK; *et al.*, 2007). Quando necessário, foi feita a conversão de unidades utilizando tabela de densidades do próprio *ecoinvent* (DOKA, 2009) ou, em caso de omissão desta, da NBR 15220 (ABNT, 2005). Os processos da base *ecoinvent* v.2.2 que utilizam energia elétrica foram modificados para refletir a matriz energética brasileira, substituindo-se a fonte original por aquelas indicadas na Tabela 5.15.

Tabela 5.15 – Processos relativos à matriz energética utilizados no inventário de ciclo de vida

Fornecimento	Nome do processo na base <i>ecoinvent</i> v. 2.2
Baixa tensão	<i>electricity, low voltage, production BR, at grid/kWh/BR</i>
Média tensão	<i>electricity, medium voltage, production BR, at grid/kWh/BR</i>
Alta tensão	<i>electricity, high voltage, production BR, at grid/kWh/BR</i>

As distâncias de transporte de materiais e componentes para as obras foram determinadas em função da localização dos fabricantes. Para cada material ou componente foi levantada a média das distâncias, em relação ao local das obras, de no mínimo três fabricantes cadastrados em diretório especializado e de acesso gratuito pela internet (E-CONSTRUMARKET, 2013). As distâncias de transporte incluídas na análise de ciclo de vida estão apresentadas na Tabela 5.16.

Tabela 5.16 – Distâncias consideradas entre a obra e fornecedor dos materiais e componentes empregados nas análises de ciclo de vida

Material/componente	Distância (km)
Concreto	36
Aço	602
Ferragens	382
Madeiras	164
Bloco cerâmico	152
Argamassa industrializada	118
Telha fibrocimento	434
Poliestireno expandido	450
Tintas	701
Granilite/grana de mármore	315
Pedra britada	403
Areia	456
Cimento	340
Argamassa colante	348
Cerâmica	162
Mármore e Pedra natural	1.387
Esquadrias em alumínio	127
Vidros	684
Portas em madeira	340
Película de controle solar	493
Brise em alumínio	433

As cargas de transporte envolvidas nas etapas internas de cada processo da base *ecoinvent 2.2* não foram modificadas. Como já foi argumentado, a elaboração de um inventário da cadeia produtiva da construção civil no Brasil excede as possibilidades e objetivos deste trabalho. A operação de transporte de materiais fábrica–obra–disposição final foi homogeneizada para o processo “*transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH*” da base *ecoinvent 2.2*. Para os processos relacionados ao transporte de cargas, o *ecoinvent* utiliza a unidade tonelada quilômetro (tkm). Esses processos levam em conta o trecho de retorno, ou seja, o deslocamento do veículo sem carga.

Os resultados dos levantamentos de quantitativos, composições e processos utilizados no inventário de ciclo de vida de cada um dos

casos analisados estão representados no Apêndice D. Os resultados das simulações termoenergéticas para o consumo de energia para operação das edificações descritos no item 5.4.1 e os quantitativos de materiais apresentados no Apêndice D foram inseridos no *SimaPro*, vinculados aos respectivos processos da base *ecoinvent*. No *SimaPro*, foram modelados o Caso base do cenário com reabilitação (que considera apenas o restauro da edificação existente); os casos 1, 4, 5, 6 e 8 do cenário com reabilitação (relativos às medidas de conservação de energia 1, 4, 5, 6 e 8 tomadas isoladamente); os casos 9 a 18 do cenário com reabilitação (concernentes às combinações das medidas de conservação de energia); e o caso Nova edificação teórica, do cenário com nova construção, tomado como referência nas comparações.

5.5 AVALIAÇÃO DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA

No *SimaPro*, foram realizadas as simulações do ciclo de vida de cada um dos casos, considerando a unidade funcional descrita no item 5.3.3 (1 vida de serviço de 60 anos) e as fronteiras do sistema detalhadas no item 5.3.4. Inicialmente, foram realizadas quatro simulações em cada caso: uma utilizando o método de análise de impacto de ciclo de vida de Demanda energética acumulada; outra para o método *ReCiPe midpoint*; a terceira para o método *ReCiPe endpoint*; e, por fim, uma quarta simulação usando o método da Pegada Ecológica.

5.5.1 Demanda energética acumulada

A Figura 5.12 apresenta a demanda energética acumulada para a obra inicial (dada pela Equação 3 para os casos do cenário com reabilitação e pela Equação 4 para o cenário com nova construção); para as obras de manutenção (calculada pela Equação 5) e para a operação das edificações (Equação 6) ao longo da vida de serviço estipulada na unidade funcional. Os resultados confirmam o que era esperado e encontrado na literatura, com a fase de operação respondendo pela maior parte dos impactos no ciclo de vida das edificações. Entretanto, chama atenção a pequena diferença entre a parcela de energia incorporada (obra inicial + manutenção) e de energia de operação nos casos do cenário com reabilitação e no cenário com nova construção.

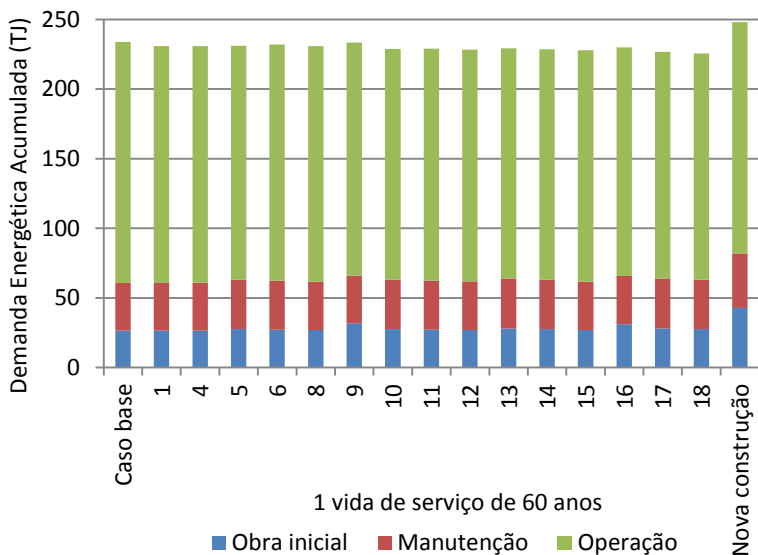


Figura 5.12 – Demanda energética acumulada, por fase de ciclo de vida, para 1 vida de serviço de 60 anos dos casos comparados.

Enquanto na nova construção a energia incorporada corresponde a 33% do total da demanda energética acumulada, no caso base a energia incorporada representa 26% do total. A relativa proximidade entre esses números pode ser explicada por dois fatores. Primeiro, diferenças significativas entre os padrões construtivos do edifício existente e do modelo da nova edificação teórica que representa o cenário com nova construção. O edifício existente possui paredes externas de aproximadamente 32 cm (ver Figura 5.5); a nova edificação teórica foi modelada com paredes de 20 cm, ou seja, envolvendo uma massa menor de blocos cerâmicos e argamassa de assentamento. Além disso, o edifício existente possui um percentual de aberturas nas fachadas de 32%, enquanto para a nova edificação teórica foi definido um percentual de 17%. De fato, na Figura 5.13 é possível observar que os fluxos de conteúdo energético mais importantes na vida de serviço do Caso base são aqueles relacionados à substituição de materiais nas paredes externas e nas esquadrias em alumínio das aberturas externas, atrás apenas da energia para operação da edificação.

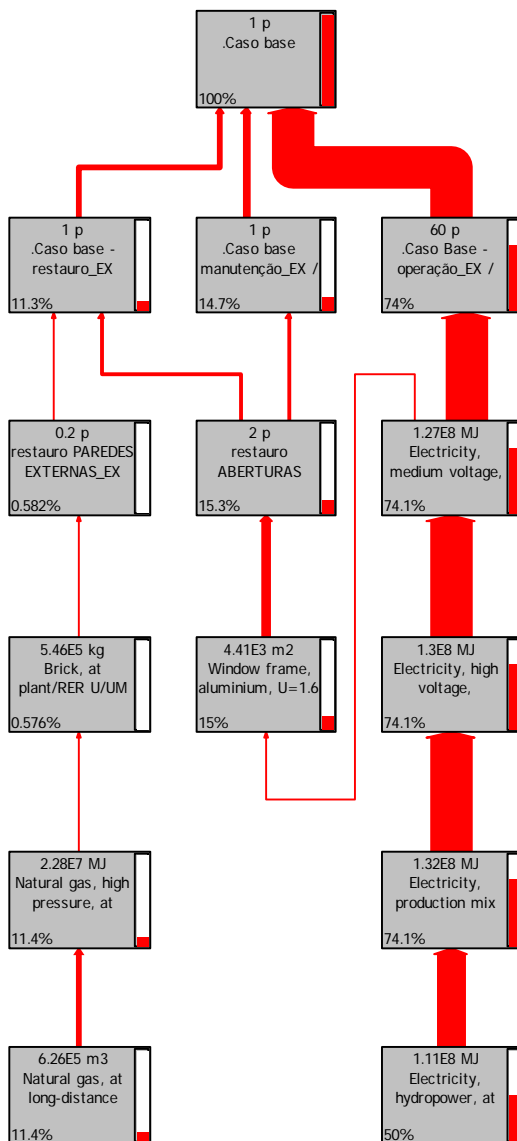


Figura 5.13 – Fluxos de conteúdo energético na vida de serviço do Caso base.

Representados apenas os fluxos com contribuição maior que 10%. Os termos em inglês correspondem aos respectivos processos na base *ecoinvent 2.2*.

O segundo fator – e que agrava o primeiro – é que o patamar de substituição de materiais na obra inicial de restauro e nas manutenções estabelecido para o cenário com reabilitação possa ter sido muito elevado (20% da área de paredes externas e 100% das aberturas das fachadas). Ainda assim, quando se avalia a demanda energética acumulada dos casos do cenário com reabilitação normalizada em relação ao cenário com nova construção (Figura 5.14), a reabilitação aparece como uma alternativa viável.

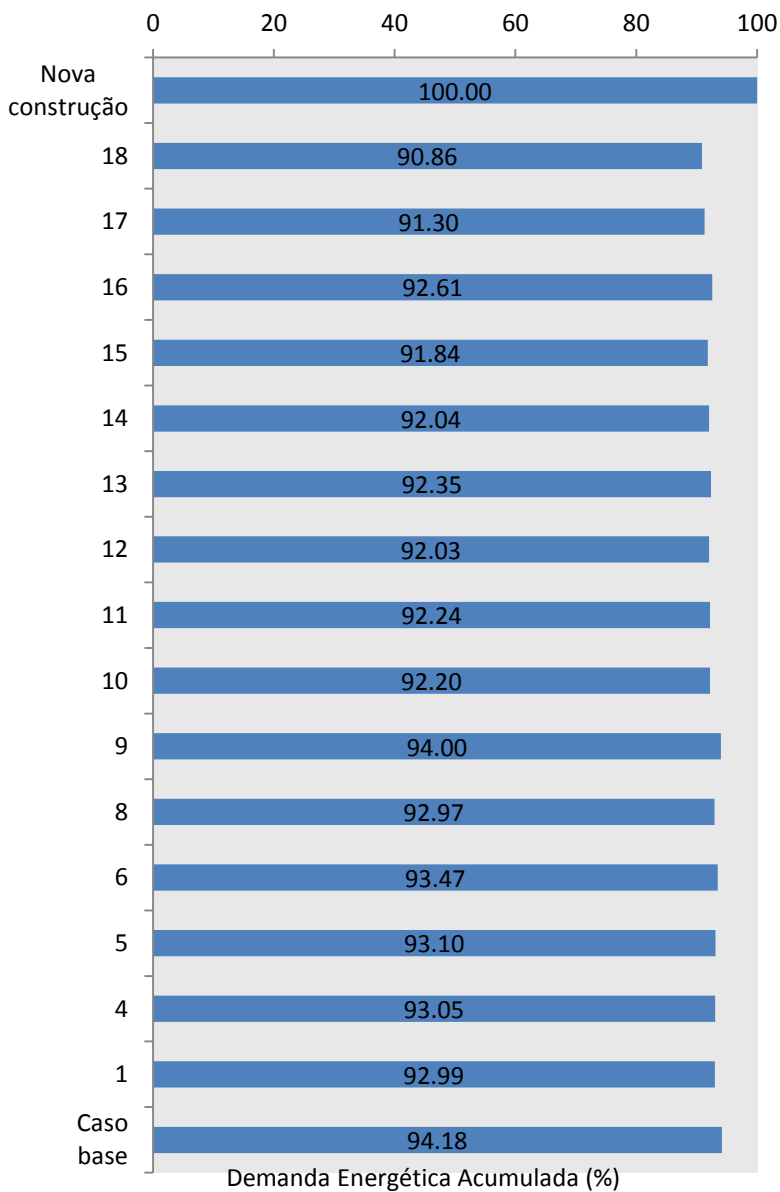


Figura 5.14 – Demanda energética acumulada em 1 vida de serviço de 60 anos, normalizada em relação ao cenário com nova construção.

5.5.2 Pegada Ecológica

Os resultados da avaliação de impacto dos casos do cenário com reabilitação e do cenário com nova construção, pelo método da Pegada ecológica, constam na Figura 5.15.

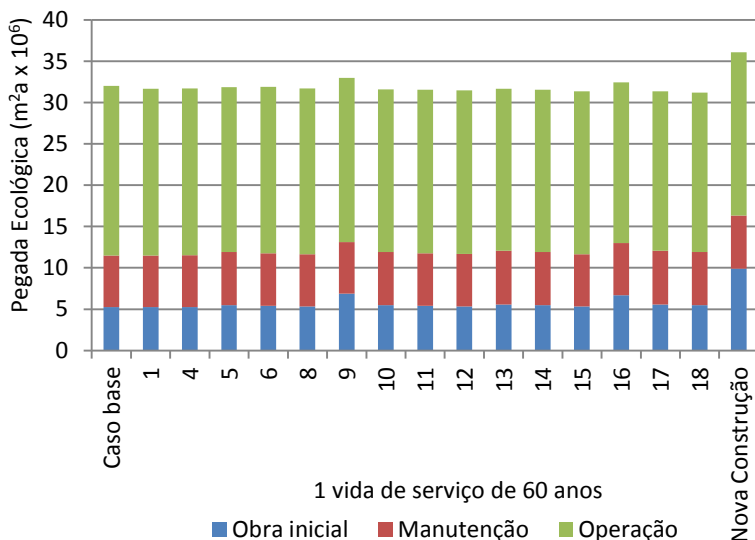


Figura 5.15 – Pegada ecológica, por fase de ciclo de vida, para 1 vida de serviço de 60 anos dos casos comparados.

Com o método da Pegada Ecológica, pode-se observar que a produção de materiais ganha um peso maior na análise do que em relação ao método da Demanda energética acumulada. A relação entre os resultados dos impactos incorporados e de operação passou para 36% e 64% no Caso base e 45% e 55% no caso do cenário com nova construção. Entretanto, sendo ainda um método essencialmente vinculado ao fluxo energético, não se alterou muito o quadro dos resultados normalizados em relação ao cenário com nova construção, expresso na Figura 5.16, embora os casos do cenário com reabilitação apareçam agora ligeiramente mais vantajosos.

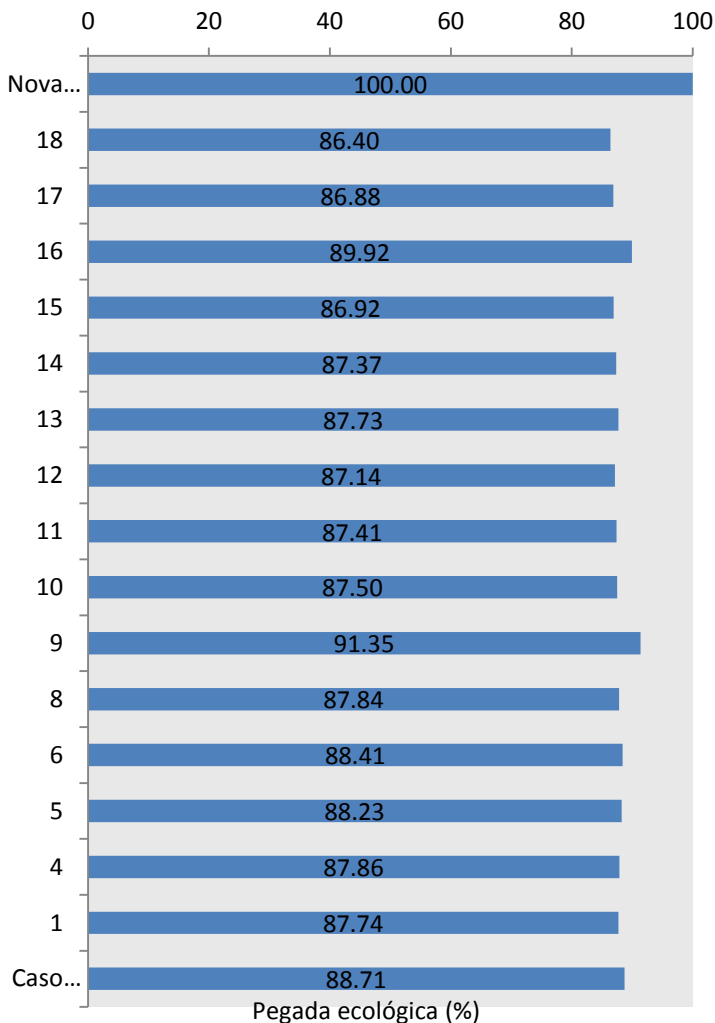


Figura 5.16 – Pegada ecológica para 1 vida de serviço de 60 anos dos casos comparados, normalizada em relação ao cenário com nova construção.

5.5.3 ReCiPe

O método *ReCiPe* avalia os impactos ambientais em 18 categorias *midpoint*. Diante da grande quantidade de dados gerados, na Tabela 5.17 são expressos somente os resultados relativos ao cenário com

nova construção e ao Caso base e o caso melhor avaliado do cenário com reabilitação, o Caso 18.

Tabela 5.17 – Impactos ambientais totais e por fase do ciclo de vida pelo método *ReCiPe midpoint* para 1 vida de serviço de 60 anos do caso base, caso 18 e do cenário com nova construção

	Categoria de impacto (unidade)	Obra inicial	Manutenção	Operação	Total
Caso base	Mudanças climáticas (kg CO ₂ eq)	1,83 . 10 ⁶	2,02 . 10 ⁶	7,88 . 10 ⁶	1,17 . 10 ⁷
	Depleção da camada de ozônio (kg CFC-11 eq)	1,52 . 10 ⁻¹	1,96 . 10 ⁻¹	3,13 . 10 ⁻¹	6,61 . 10 ⁻¹
	Acidificação do solo (kg SO ₂ eq)	6,77 . 10 ³	8,55 . 10 ³	6,27 . 10 ³	2,16 . 10 ⁴
	Eutrofização de águas potáveis (kg P eq)	4,37 . 10 ²	5,60 . 10 ²	3,59 . 10 ²	1,35 . 10 ³
	Eutrofização de águas marinhas (kg N eq)	4,39 . 10 ²	1,15 . 10 ³	2,68 . 10 ²	1,86 . 10 ³
	Toxicidade humana (kg 1,4-DB eq)	3,81 . 10 ⁵	4,81 . 10 ⁵	3,30 . 10 ⁵	1,19 . 10 ⁶
	Formação de foto- oxidantes (kg NMVOC)	6,80 . 10 ³	7,10 . 10 ³	8,48 . 10 ³	2,24 . 10 ⁴
	Formação de particulados (kg PM10 eq)	3,27 . 10 ³	3,79 . 10 ³	2,16 . 10 ³	9,22 . 10 ³
	Ecotoxicidade dos solos (kg 1,4-DB eq)	1,35 . 10 ²	5,56 . 10 ²	9,77 . 10 ²	1,67 . 10 ³
	Ecotoxicidade das águas potáveis (kg 1,4-DB eq)	1,04 . 10 ⁴	1,32 . 10 ⁴	6,68 . 10 ³	3,03 . 10 ⁴
	Ecotoxicidade das águas marinhas (kg 1,4-DB eq)	1,06 . 10 ⁴	1,30 . 10 ⁴	5,75 . 10 ³	2,94 . 10 ⁴
	Radiações ionizantes (kg U235 eq)	3,12 . 10 ⁵	3,89 . 10 ⁵	1,19 . 10 ⁶	1,89 . 10 ⁶
	Ocupação do solo arável (m ² a)	2,05 . 10 ⁵	4,57 . 10 ⁵	1,62 . 10 ⁵	8,23 . 10 ⁵
	Ocupação do solo urbano (m ² a)	6,35 . 10 ³	9,32 . 10 ³	4,14 . 10 ³	1,98 . 10 ⁴
	Transformação do ambiente natural (m ²)	-8,70 . 10 ¹	2,05 . 10 ¹	7,08 . 10 ³	7,02 . 10 ³
	Esgotamento de mananciais (m ³)	1,03 . 10 ⁴	1,30 . 10 ⁴	1,50 . 10 ⁴	3,83 . 10 ⁴
	Depleção de recursos minerais (kg Fe eq)	1,49 . 10 ⁴	2,05 . 10 ⁴	2,68 . 10 ²	3,57 . 10 ⁴
	Depleção de recursos fósseis (kg oil eq)	1,51 . 10 ³	1,67 . 10 ³	3,59 . 10 ³	6,77 . 10 ³

Continua na página seguinte.

Tabela 5.17 – Impactos ambientais totais e por fase do ciclo de vida pelo método *ReCiPe* midpoint para 1 vida de serviço de 60 anos do caso base, caso 18 e do cenário com nova construção

	Categoria de impacto (unidade)	Obra inicial	Manutenção	Operação	Total
Caso 18	Mudanças climáticas (kg CO ₂ eq)	1,90 . 10 ⁶	2,09 . 10 ⁶	7,39 . 10 ⁶	1,14 . 10 ⁷
	Depleção da camada de ozônio (kg CFC-11 eq)	1,58 . 10 ⁻¹	2,02 . 10 ⁻¹	2,94 . 10 ⁻¹	6,54 . 10 ⁻¹
	Acidificação do solo (kg SO ₂ eq)	7,16 . 10 ³	8,93 . 10 ³	5,88 . 10 ³	2,20 . 10 ⁴
	Eutrofização de águas potáveis (kg P eq)	4,63 . 10 ²	5,86 . 10 ²	3,37 . 10 ²	1,39 . 10 ³
	Eutrofização de águas marinhas (kg N eq)	4,55 . 10 ²	1,17 . 10 ³	2,51 . 10 ²	1,88 . 10 ³
	Toxicidade humana (kg 1,4-DB eq)	4,05 . 10 ⁵	5,05 . 10 ⁵	3,10 . 10 ⁵	1,22 . 10 ⁶
	Formação de foto- oxidantes (kg NMVOC)	7,06 . 10 ³	7,37 . 10 ³	7,96 . 10 ³	2,24 . 10 ⁴
	Formação de particulados (kg PM10 eq)	3,42 . 10 ³	3,94 . 10 ³	2,03 . 10 ³	9,39 . 10 ³
	Ecotoxicidade dos solos (kg 1,4-DB eq)	1,40 . 10 ²	5,61 . 10 ²	9,17 . 10 ²	1,62 . 10 ³
	Ecotoxicidade das águas potáveis (kg 1,4-DB eq)	1,10 . 10 ⁴	1,38 . 10 ⁴	6,27 . 10 ³	3,11 . 10 ⁴
	Ecotoxicidade das águas marinhas (kg 1,4-DB eq)	1,12 . 10 ⁴	1,36 . 10 ⁴	5,40 . 10 ³	3,03 . 10 ⁴
	Radiações ionizantes (kg U235 eq)	3,29 . 10 ⁵	4,07 . 10 ⁵	1,11 . 10 ⁶	1,85 . 10 ⁶
	Ocupação do solo arável (m ² a)	2,06 . 10 ⁵	4,58 . 10 ⁵	1,52 . 10 ⁵	8,15 . 10 ⁵
	Ocupação do solo urbano (m ² a)	6,55 . 10 ³	9,54 . 10 ³	3,88 . 10 ³	2,00 . 10 ⁴
	Transformação do ambiente natural (m ²)	-8,29 . 10 ¹	2,35 . 10 ¹	6,65 . 10 ³	6,59 . 10 ³
	Esgotamento de mananciais (m ³)	1,08 . 10 ⁴	1,35 . 10 ⁴	1,41 . 10 ⁴	3,84 . 10 ⁴
	Depleção de recursos minerais (kg Fe eq)	1,60 . 10 ⁴	2,16 . 10 ⁴	2,51 . 10 ²	3,79 . 10 ⁴
	Depleção de recursos fósseis (kg oil eq)	1,58 . 10 ³	1,74 . 10 ³	3,37 . 10 ³	6,69 . 10 ³

Continua na página seguinte.

Tabela 5.17 – Impactos ambientais totais e por fase do ciclo de vida pelo método *ReCiPe* midpoint para 1 vida de serviço de 60 anos do caso base, caso 18 e do cenário com nova construção

	Categoria de impacto (unidade)	Obra inicial	Manutenção	Operação	Total
Nova construção	Mudanças climáticas (kg CO ₂ eq)	$3,53 \cdot 10^6$	$2,25 \cdot 10^6$	$7,57 \cdot 10^6$	$1,34 \cdot 10^7$
	Depleção da camada de ozônio (kg CFC-11 eq)	$2,83 \cdot 10^{-1}$	$2,56 \cdot 10^{-1}$	$3,01 \cdot 10^{-1}$	$8,40 \cdot 10^{-1}$
	Acidificação do solo (kg SO ₂ eq)	$1,12 \cdot 10^4$	$8,52 \cdot 10^3$	$6,03 \cdot 10^3$	$2,57 \cdot 10^4$
	Eutrofização de águas potáveis (kg P eq)	$5,13 \cdot 10^2$	$4,85 \cdot 10^2$	$3,45 \cdot 10^2$	$1,34 \cdot 10^3$
	Eutrofização de águas marinhas (kg N eq)	$6,55 \cdot 10^2$	$1,07 \cdot 10^3$	$2,57 \cdot 10^2$	$1,98 \cdot 10^3$
	Toxicidade humana (kg 1,4-DB eq)	$5,60 \cdot 10^5$	$4,63 \cdot 10^5$	$3,18 \cdot 10^5$	$1,34 \cdot 10^6$
	Formação de foto- oxidantes (kg NMVOC)	$1,46 \cdot 10^4$	$7,79 \cdot 10^3$	$8,15 \cdot 10^3$	$3,05 \cdot 10^4$
	Formação de particulados (kg PM ₁₀ eq)	$1,02 \cdot 10^4$	$1,10 \cdot 10^4$	$2,08 \cdot 10^3$	$2,33 \cdot 10^4$
	Ecotoxicidade dos solos (kg 1,4-DB eq)	$2,13 \cdot 10^2$	$5,39 \cdot 10^2$	$9,39 \cdot 10^2$	$1,69 \cdot 10^3$
	Ecotoxicidade das águas potáveis (kg 1,4-DB eq)	$1,22 \cdot 10^4$	$1,14 \cdot 10^4$	$6,43 \cdot 10^3$	$3,01 \cdot 10^4$
	Ecotoxicidade das águas marinhas (kg 1,4-DB eq)	$1,26 \cdot 10^4$	$1,09 \cdot 10^4$	$5,53 \cdot 10^3$	$2,91 \cdot 10^4$
	Radiações ionizantes (kg U235 eq)	$3,73 \cdot 10^5$	$3,61 \cdot 10^5$	$1,14 \cdot 10^6$	$1,88 \cdot 10^6$
	Ocupação do solo arável (m ² a)	$1,62 \cdot 10^5$	$1,56 \cdot 10^5$	$1,55 \cdot 10^5$	$4,74 \cdot 10^5$
	Ocupação do solo urbano (m ² a)	$1,45 \cdot 10^4$	$7,05 \cdot 10^3$	$3,98 \cdot 10^3$	$2,55 \cdot 10^4$
	Transformação do ambiente natural (m ²)	$-4,99 \cdot 10^2$	$7,22 \cdot 10^1$	$6,81 \cdot 10^3$	$6,39 \cdot 10^3$
	Esgotamento de mananciais (m ³)	$2,56 \cdot 10^4$	$1,46 \cdot 10^4$	$1,45 \cdot 10^4$	$5,47 \cdot 10^4$
	Depleção de recursos minerais (kg Fe eq)	$2,75 \cdot 10^4$	$1,69 \cdot 10^4$	$2,58 \cdot 10^2$	$4,46 \cdot 10^4$
	Depleção de recursos fósseis (kg oil eq)	$2,88 \cdot 10^3$	$1,33 \cdot 10^3$	$3,45 \cdot 10^3$	$7,67 \cdot 10^3$

Como as categorias de impacto no *ReCiPe* são caracterizadas em diferentes unidades, para facilitar a comparação os resultados

aparecem expressos na Figura 5.17 já normalizados em relação ao cenário com nova construção.

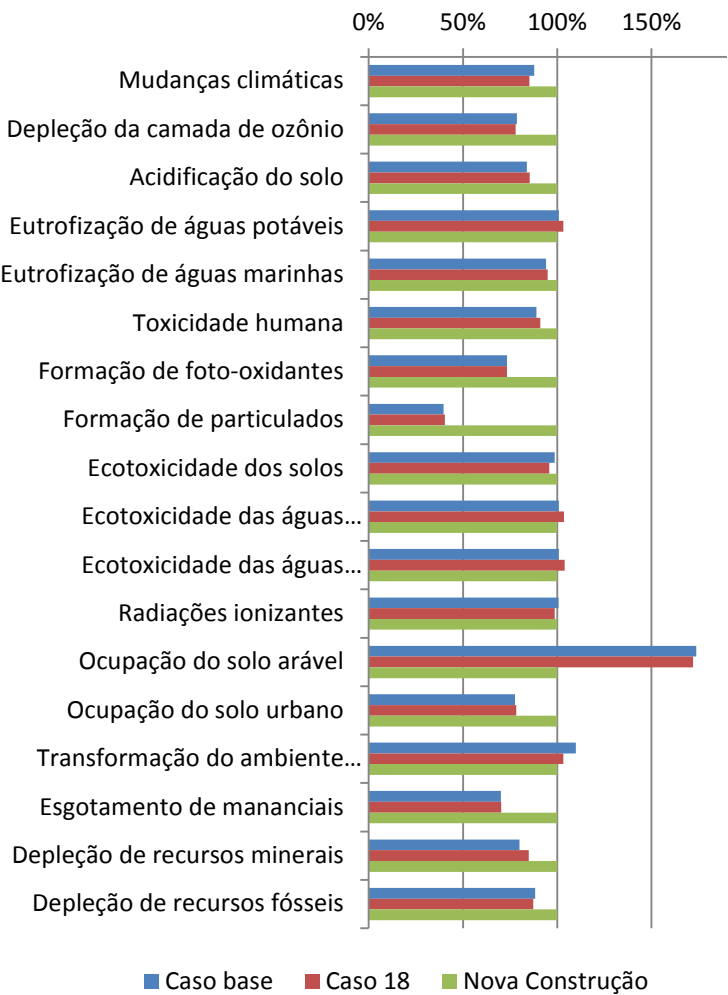


Figura 5.17 – Impactos ambientais totais pelo método *ReCiPe midpoint* para 1 vida de serviço de 60 anos do caso base e do caso 18, normalizados em relação ao cenário com nova construção.

Na Figura 5.17 é possível constatar que em algumas categorias os impactos dos casos do cenário com reabilitação excederam os impactos do cenário com nova construção, notadamente na categoria ocupação do solo arável (ou biologicamente produtivo). Os impactos nessa categoria são devidos à utilização de madeira nos pisos da edificação existente, enquanto que a edificação teórica do cenário com nova construção foi modelada com pisos em cerâmica. No modelo do Caso base, os impactos do cenário com reabilitação excedem o cenário com nova construção ainda em outras categorias, que aparecem em menor número no Caso 18, cujos efeitos são mitigados pelo menor consumo de energia para operação. A carga dos impactos que no Caso base excedem aqueles do caso do cenário com nova construção é maior na fase de manutenção da edificação, ou seja, incorporados nos materiais e componentes construtivos substituídos ao longo da vida de serviço da edificação. Na Figura 5.18 é possível observar a relação entre os materiais e componentes envolvidos na manutenção do Caso base e as categorias de impacto.

O alumínio das esquadrias das aberturas externas, mais uma vez, aparece como responsável pelos maiores impactos em quase todas as categorias. Comparando-se as fases de manutenção do modelo do cenário com nova construção e do Caso base, o uso mais intensivo de alumínio neste último faz com que seus impactos sejam maiores na acidificação dos solos; na eutrofização de águas potáveis; na toxicidade humana; na Ecotoxicidade das águas potáveis e marinhas; na radiação ionizante; e na depleção de recursos minerais e fósseis. Na Figura 5.17 é possível observar que os impactos do Caso 18 são maiores que os do Caso base praticamente nas mesmas categorias (a exceção fica por conta daquelas em que o consumo de energia de operação, que é menor no Caso 18, também influencia na categoria). O Caso 18 foi modelado com a adição de brises em alumínio, o que demonstra que uma medida de conservação de energia nem sempre é vantajosa do ponto de vista ambiental. As tintas para pintura também contribuem significativamente com o alumínio naquelas mesmas categorias de impacto. A edificação existente possui mais áreas de pintura, já que o modelo na nova edificação teórica tem suas fachadas revestidas com cerâmica.

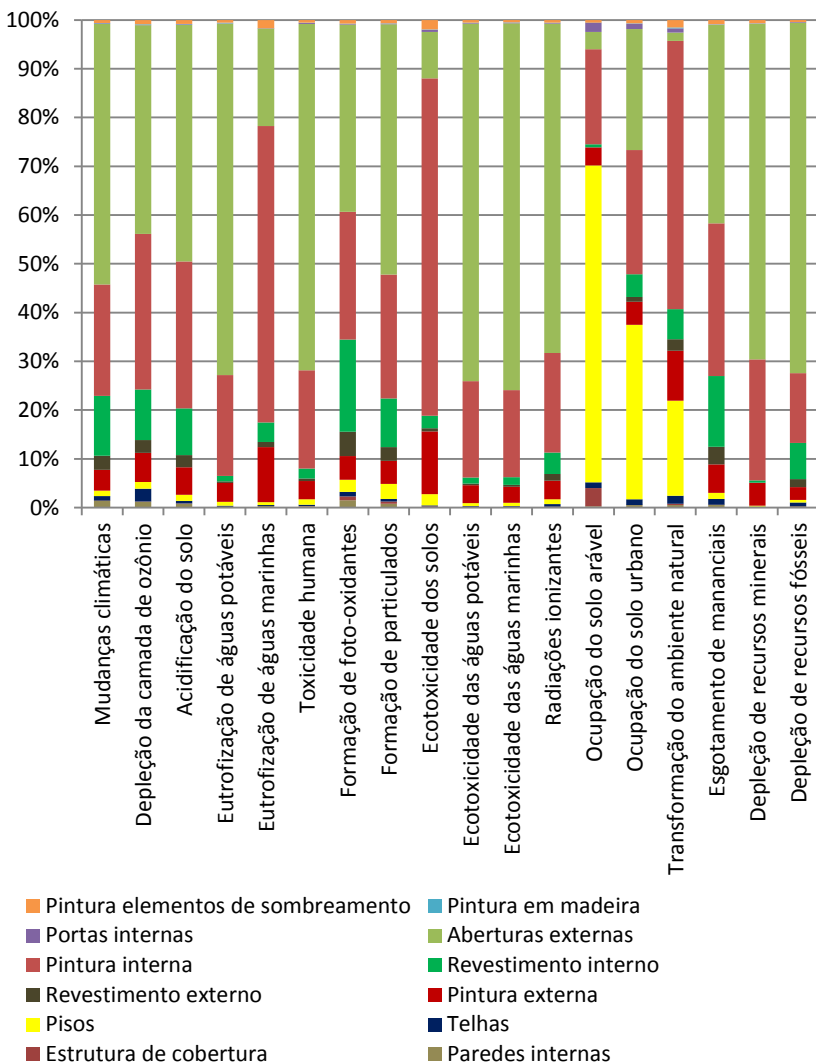


Figura 5.18 – Impactos ambientais pelo método *ReCiPe midpoint* para a manutenção ao longo de 1 vida de serviço de 60 anos do caso base, por parcela de contribuição de cada componente construtivo.

Se esses resultados das categorias de impacto *midpoint* do *ReCiPe* parecem desfavoráveis ao cenário com reabilitação quando

analisados isoladamente, eles se diluem quando são agregados a outros impactos nas categorias *endpoint* e analisados enquanto danos ambientais. Na Tabela 5.18 aparecem expressos os resultados nessas categorias para todos os casos do cenário com reabilitação e para o caso do cenário com nova construção. A relação entre as categorias *midpoint* e *endpoint* do *ReCiPe* pode ser conferida no Anexo B.

Tabela 5.18 – Danos ambientais totais e por fase do ciclo de vida pelo método *ReCiPe endpoint* para 1 vida de serviço de 60 anos do caso base, caso 18 e do cenário com nova construção

	Categoria de dano (unidade)	Obra inicial	Manutenção	Operação	Total
Caso base	Saúde humana (DALY)	3,68	4,15	11,84	19,67
	Diversidade dos ecossistemas (espécies.ano)	0,02	0,02	0,08	0,12
	Disponibilidade de recursos abióticos (\$)	1317,44	1745,79	614,49	3677,71
1	Saúde humana (DALY)	3,68	4,15	11,64	19,47
	Diversidade dos ecossistemas (espécies.ano)	0,02	0,02	0,08	0,12
	Disponibilidade de recursos abióticos (\$)	1317,44	1745,79	604,00	3667,23
4	Saúde humana (DALY)	3,68	4,18	11,63	19,49
	Diversidade dos ecossistemas (espécies.ano)	0,02	0,02	0,08	0,12
	Disponibilidade de recursos abióticos (\$)	1317,65	1746,26	603,66	3667,56
5	Saúde humana (DALY)	3,82	4,30	11,49	19,62
	Diversidade dos ecossistemas (espécies.ano)	0,02	0,02	0,08	0,12
	Disponibilidade de recursos abióticos (\$)	1387,50	1815,85	596,56	3799,91
6	Saúde humana (DALY)	3,78	4,26	11,61	19,65
	Diversidade dos ecossistemas (espécies.ano)	0,02	0,02	0,08	0,12
	Disponibilidade de recursos abióticos (\$)	1385,09	1813,44	602,93	3801,47

Continua na página seguinte.

Tabela 5.18 – Danos ambientais totais e por fase do ciclo de vida pelo método ReCiPe endpoint para 1 vida de serviço de 60 anos do caso base, caso 18 e do cenário com nova construção

	Categoria de dano (unidade)	Obra inicial	Manutenção	Operação	Total
8	Saúde humana (DALY)	3,73	4,21	11,57	19,52
	Diversidade dos ecossistemas (espécies.ano)	0,02	0,02	0,08	0,12
	Disponibilidade de recursos abióticos (\$)	1339,06	1767,41	600,77	3707,24
9	Saúde humana (DALY)	4,71	4,17	11,44	20,33
	Diversidade dos ecossistemas (espécies.ano)	0,02	0,02	0,08	0,12
	Disponibilidade de recursos abióticos (\$)	1348,19	1746,00	593,95	3688,13
10	Saúde humana (DALY)	3,82	4,30	11,34	19,46
	Diversidade dos ecossistemas (espécies.ano)	0,02	0,02	0,08	0,12
	Disponibilidade de recursos abióticos (\$)	1387,50	1815,85	588,66	3792,01
11	Saúde humana (DALY)	3,78	4,26	11,41	19,44
	Diversidade dos ecossistemas (espécies.ano)	0,02	0,02	0,08	0,12
	Disponibilidade de recursos abióticos (\$)	1385,09	1813,44	592,07	3790,61
12	Saúde humana (DALY)	3,74	4,24	11,40	19,37
	Diversidade dos ecossistemas (espécies.ano)	0,02	0,02	0,08	0,12
	Disponibilidade de recursos abióticos (\$)	1339,27	1767,88	591,64	3698,79
13	Saúde humana (DALY)	3,88	4,36	11,31	19,54
	Diversidade dos ecossistemas (espécies.ano)	0,02	0,02	0,08	0,12
	Disponibilidade de recursos abióticos (\$)	1409,12	1837,47	586,87	3833,47
14	Saúde humana (DALY)	3,84	4,31	11,31	19,46
	Diversidade dos ecossistemas (espécies.ano)	0,02	0,02	0,08	0,12
	Disponibilidade de recursos abióticos (\$)	1406,71	1835,07	587,28	3829,06

Continua na página seguinte.

Tabela 5.18 – Danos ambientais totais e por fase do ciclo de vida pelo método *ReCiPe* endpoint para 1 vida de serviço de 60 anos do caso base, caso 18 e do cenário com nova construção

	Categoria de dano (unidade)	Obra inicial	Manutenção	Operação	Total
15	Saúde humana (DALY)	3,73	4,21	11,38	19,33
	Diversidade dos ecossistemas (espécies.ano)	0,02	0,02	0,08	0,12
	Disponibilidade de recursos abióticos (\$)	1339,06	1767,41	590,82	3697,29
16	Saúde humana (DALY)	4,60	4,23	11,22	20,05
	Diversidade dos ecossistemas (espécies.ano)	0,02	0,02	0,08	0,12
	Disponibilidade de recursos abióticos (\$)	1364,70	1767,63	582,35	3714,68
17	Saúde humana (DALY)	3,88	4,36	11,13	19,37
	Diversidade dos ecossistemas (espécies.ano)	0,02	0,02	0,07	0,12
	Disponibilidade de recursos abióticos (\$)	1409,12	1837,47	577,65	3824,25
18	Saúde humana (DALY)	3,84	4,31	11,11	19,26
	Diversidade dos ecossistemas (espécies.ano)	0,02	0,02	0,07	0,12
	Disponibilidade de recursos abióticos (\$)	1406,71	1835,07	576,89	3818,67
Nova construção	Saúde humana (DALY)	7,99	6,33	11,38	25,71
	Diversidade dos ecossistemas (espécies.ano)	0,03	0,02	0,08	0,13
	Disponibilidade de recursos abióticos (\$)	2448,45	1427,05	590,94	4466,44

Na análise pelas categorias *endpoint* do *ReCiPe*, a reabilitação é viável em todos os casos. O melhor caso de reabilitação, o Caso 18, causa mais danos que o Caso base apenas com relação à depleção de recursos abióticos. Na Figura 5.19 é possível visualizar essas constatações a partir dos resultados normalizados em relação ao cenário com nova construção.

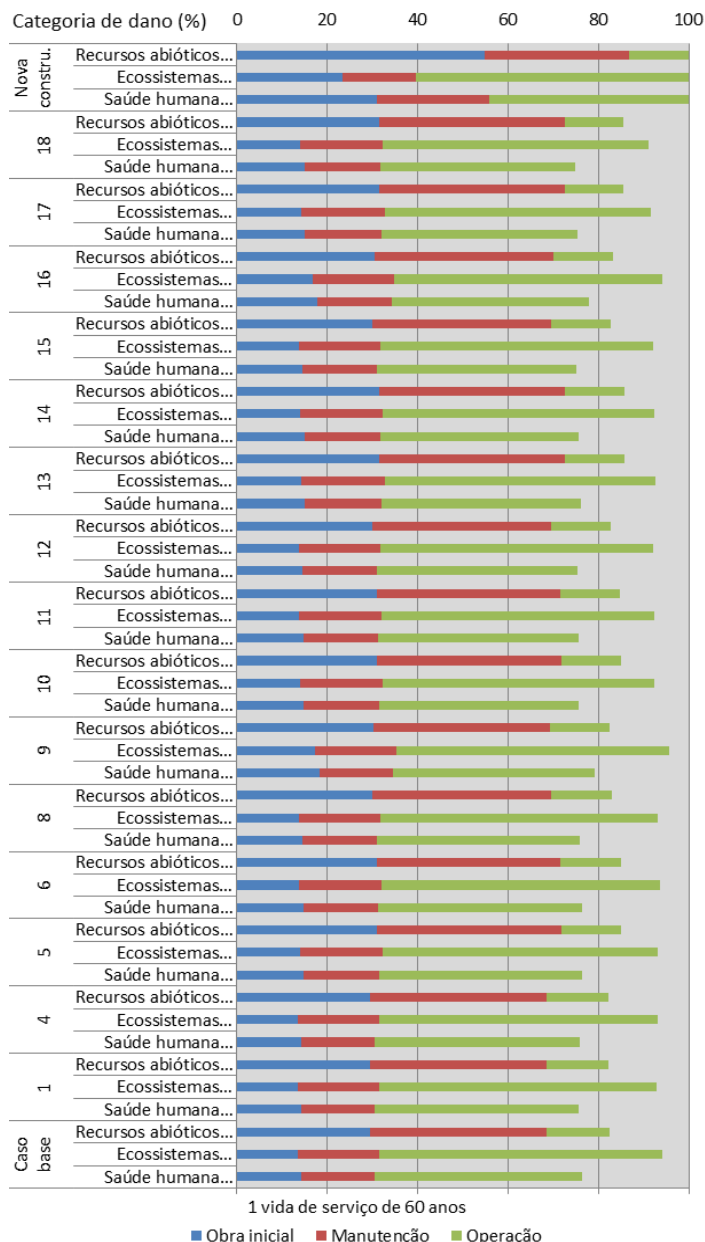


Figura 5.19 – Danos ambientais totais pelo método *ReCiPe endpoint*, normalizados em relação ao cenário com nova construção.

Na Figura 5.19 também é possível aferir o peso de cada fase do ciclo de vida das edificações nos danos ambientais provocados ao longo de sua vida de serviço. A obra inicial e as obras de manutenção impactam mais na depleção de recursos abióticos, uma vez que essa categoria de dano é mais influenciada pela extração de matérias-primas. As proporções dos impactos da obra inicial e da manutenção entre o Caso base e o caso do cenário com nova construção expressam melhor os resultados que eram esperados nessa comparação, a despeito do que fora discutido no item 5.6.1 sobre a massa de materiais na edificação existente e a estimativa de quantitativos para sua manutenção. A diversidade dos ecossistemas é mais influenciada pela geração e consumo de energia, daí o maior peso da fase de operação das edificações nessa categoria de dano.

5.6 ANÁLISES DE SENSIBILIDADE

Com o intuito de se verificar a influência dos dados de entrada do inventário de ciclo de vida nos resultados finais da avaliação de impacto de ciclo de vida, foram realizadas análises de sensibilidade variando os quantitativos conforme descrito no item 3.1.3.3. As variações foram realizadas diretamente nas simulações no *SimaPro* para o Caso base e o Caso 18 do cenário com reabilitação e para o caso do cenário com nova construção.

5.6.1 Variação nos quantitativos de materiais da obra inicial (construção e demolição)

A obra inicial do cenário com reabilitação considerou inicialmente a demolição e re-execução de 20% dos componentes manuteníveis do edifício existente e a substituição de 100% dos componentes substituíveis. Para aferir-se o impacto dessa premissa, foram realizadas variações considerando a demolição e refazimento de 10%, 30% e 40% dos componentes manuteníveis. Para o cenário com nova construção, foram realizadas variações nos quantitativos de material para a construção considerando os limites inferior e superior dos índices de produtividade para cada componente na TCPO 13. Os resultados da demanda energética acumulada na vida de serviço do Caso base, Caso 18 e do caso do cenário com nova construção são apresentados na Figura 5.20.

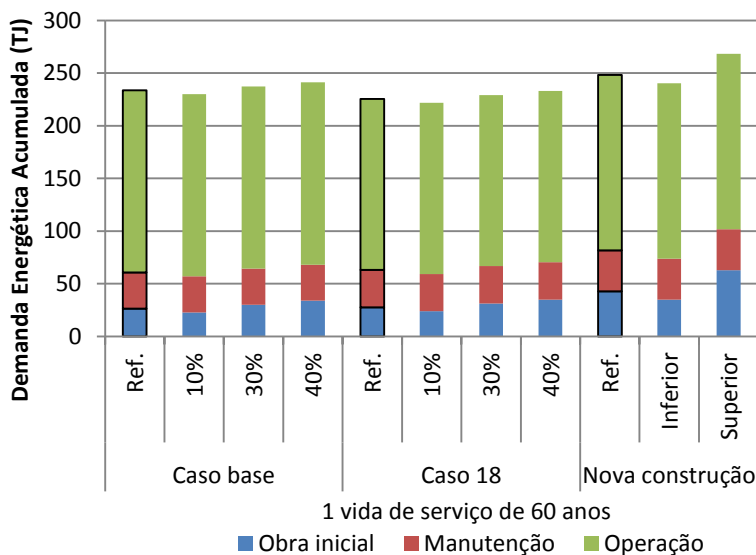


Figura 5.20 – Resultados das variações nos quantitativos de material para a obra inicial pelo método Demanda energética acumulada.

Como já havia sido apontada a predominância da fase de operação na demanda energética acumulada na vida de serviço dos modelos, os resultados praticamente não se alteraram. Considerando a variação de 40% do Caso base e do Caso 18, a participação da obra inicial no total da demanda energética acumulada aumentou em apenas dois pontos percentuais. O resultado da comparação entre o cenário com reabilitação e o cenário com nova construção apenas se alteraria se o nível de intervenção na obra inicial do edifício existente fosse da ordem de 40% e se a nova edificação fosse construída com os melhores índices de produtividade da TCPO 13. As mesmas constatações dessa análise de sensibilidade para a demanda energética acumulada podem ser conferidas nas simulações realizadas considerando o método da Pegada ecológica, cujos resultados estão apresentados na Figura 5.21.

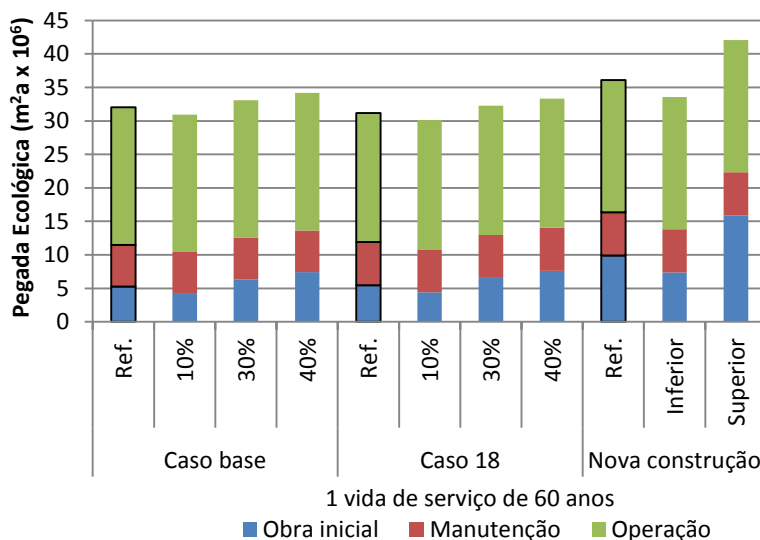


Figura 5.21 – Resultados das variações nos quantitativos de material para a obra inicial pelo método Pegada ecológica.

Na análise de sensibilidade pelo método *ReCiPe*, a confrontação entre o cenário com reabilitação e o cenário com nova construção também seria alterado apenas na variação para o patamar de 40% de intervenção na obra inicial do edifício existente comparada com a variação para o limite inferior nos índices de produtividade da nova construção, e somente para a categoria de danos à diversidade dos ecossistemas (Figura 5.22). O maior impacto nessa categoria de danos no cenário com reabilitação advém do aumento da participação da produção de cimento e de transporte de materiais para o restauro da estrutura, das alvenarias externas e do reboco interno do edifício existente.

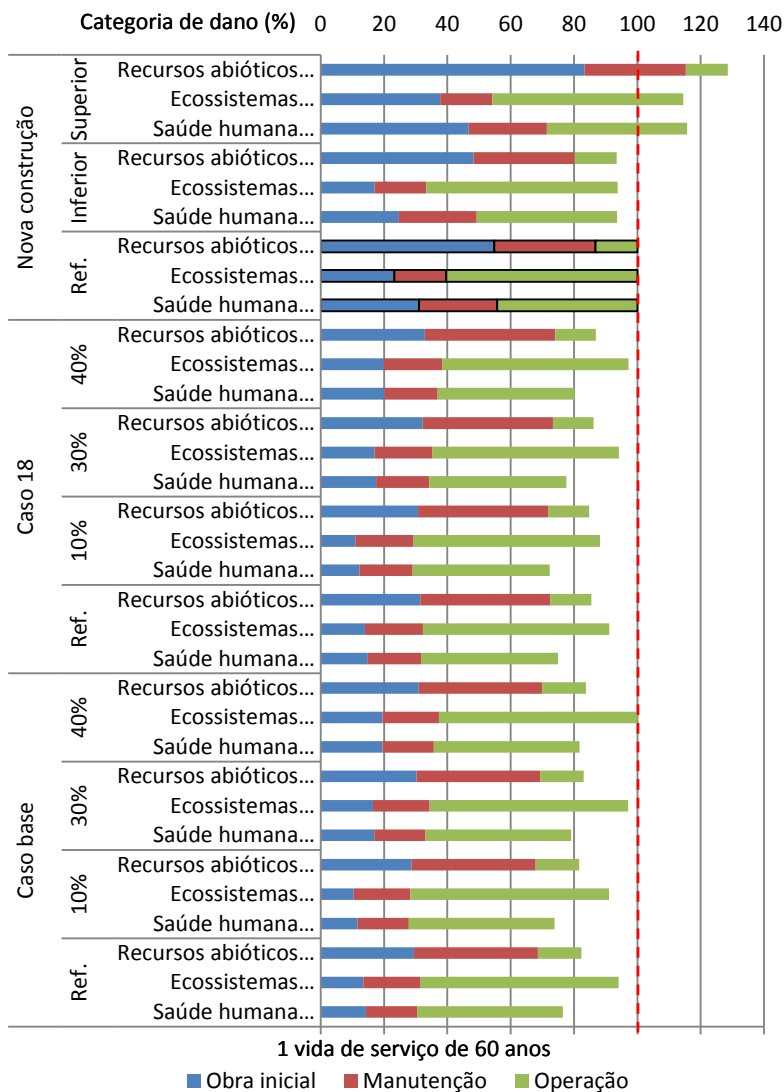


Figura 5.22 – Resultados das variações nos quantitativos de material para a obra inicial pelo método *ReCiPe*.

5.6.2 Variação nos quantitativos de materiais para manutenção (construção e demolição)

Para a fase de manutenção, foram realizadas análises de sensibilidade variando-se o nível de intervenção nos componentes manuteníveis das edificações de 20% para 10%, 30% e 40%, em ambos os cenários. Tanto para a demanda energética acumulada (Figura 5.23) quanto para os métodos da Pegada Ecológica (Figura 5.24) e *ReCiPe* (Figura 5.25), não haveria alterações significativas na comparação entre o cenário com reabilitação e o cenário com nova construção.

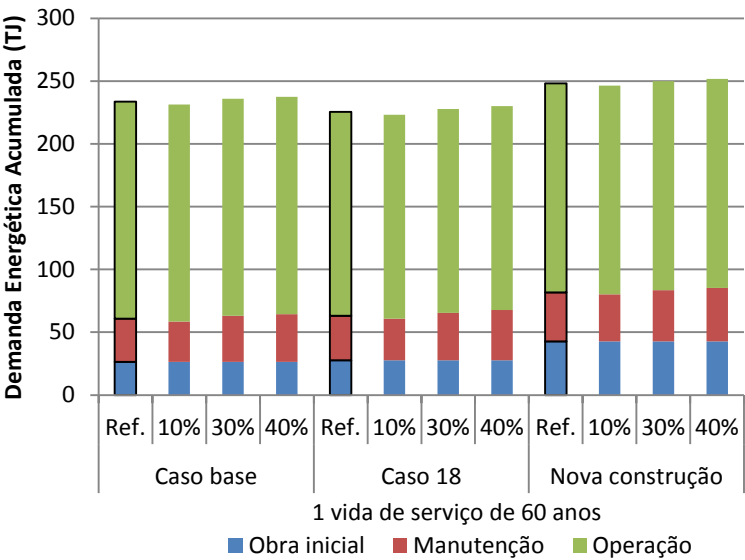


Figura 5.23 – Resultados das variações nos quantitativos de material para a manutenção das edificações pelo método Demanda energética acumulada.

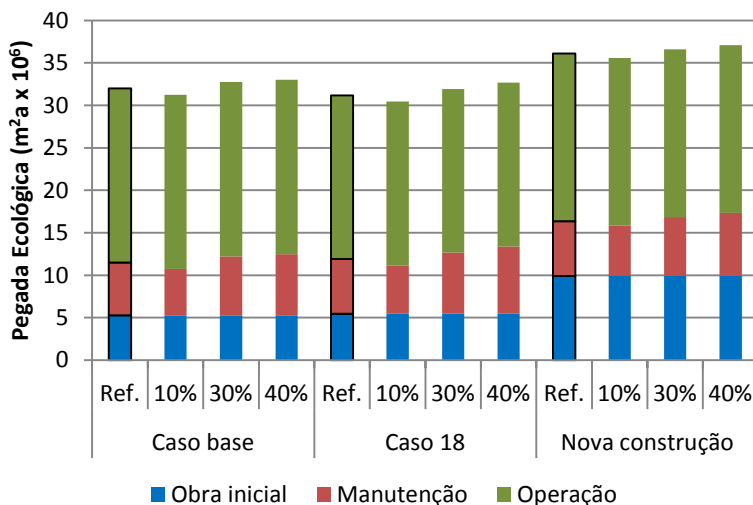


Figura 5.24 – Resultados das variações nos quantitativos de material para a manutenção das edificações pelo método Pegada ecológica.

No método *ReCiPe* (Figura 5.25), o maior incremento proporcional nos danos à diversidade dos ecossistemas no cenário com reabilitação deve-se principalmente à maior participação da produção de cimento e transporte de materiais para o restauro do reboco interno da edificação existente.

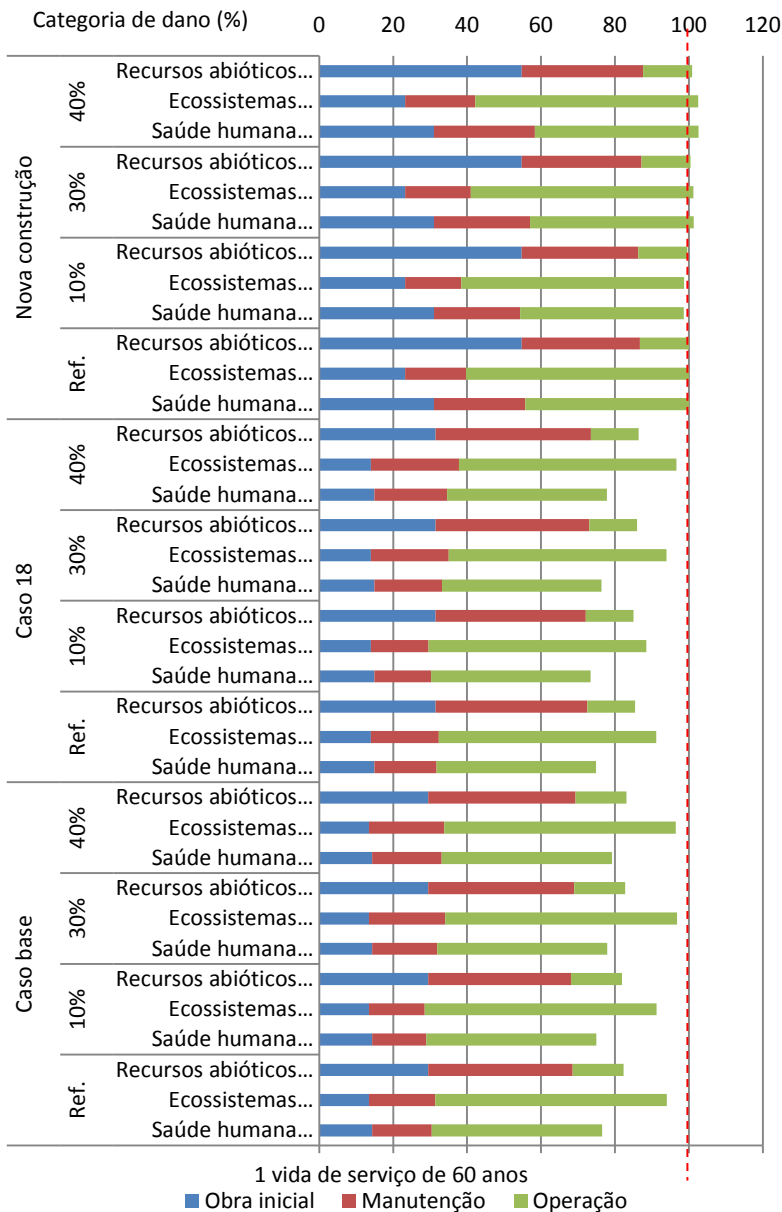


Figura 5.25 – Resultados das variações nos quantitativos de material para a manutenção das edificações pelo método *ReCiPe*.

5.6.3 Variação no consumo de energia para operação

Para a fase de operação das edificações, o consumo anual de energia do Caso base, do Caso 18 e do caso do cenário com nova construção foi variado em $\pm 5\%$, $\pm 10\%$ e $\pm 20\%$. Considerando a significativa participação da etapa de operação na vida de serviço das edificações, para que a reabilitação continuasse a ser viável pelos métodos da demanda energética acumulada (Figura 5.26) e Pegada ecológica (Figura 5.27), a variação no consumo anual de energia no cenário com reabilitação não poderia exceder os 10% para maior.

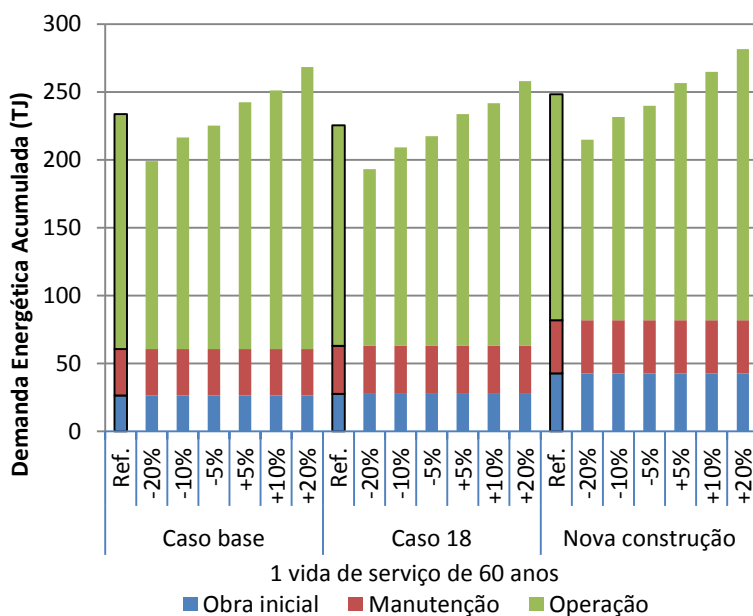
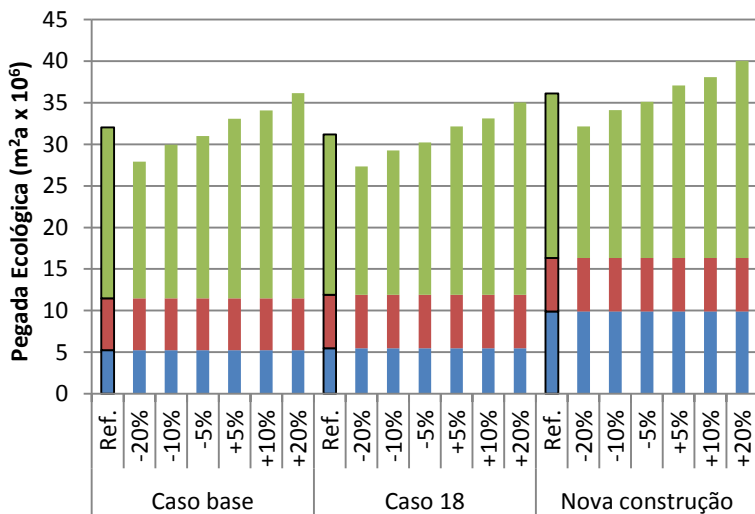


Figura 5.26 – Resultados das variações no consumo anual de energia pelas edificações de acordo com o método da Demanda energética acumulada.



1 vida de serviço de 60 anos ■ Obra inicial ■ Manutenção ■ Operação

Figura 5.27 – Resultados das variações no consumo anual de energia pelas edificações de acordo com o método da Pegada ecológica.

Pelo método *ReCiPe*, a reabilitação não seria viável somente na variação em 20% para maior no consumo de energia para operação do cenário com reabilitação, e apenas na categoria de danos à diversidade dos ecossistemas. Vale lembrar que a modelagem da etapa de operação das edificações usa exclusivamente o processo da base *ecoinvent* baseado na análise de ciclo de vida da geração e transmissão de eletricidade no Brasil.

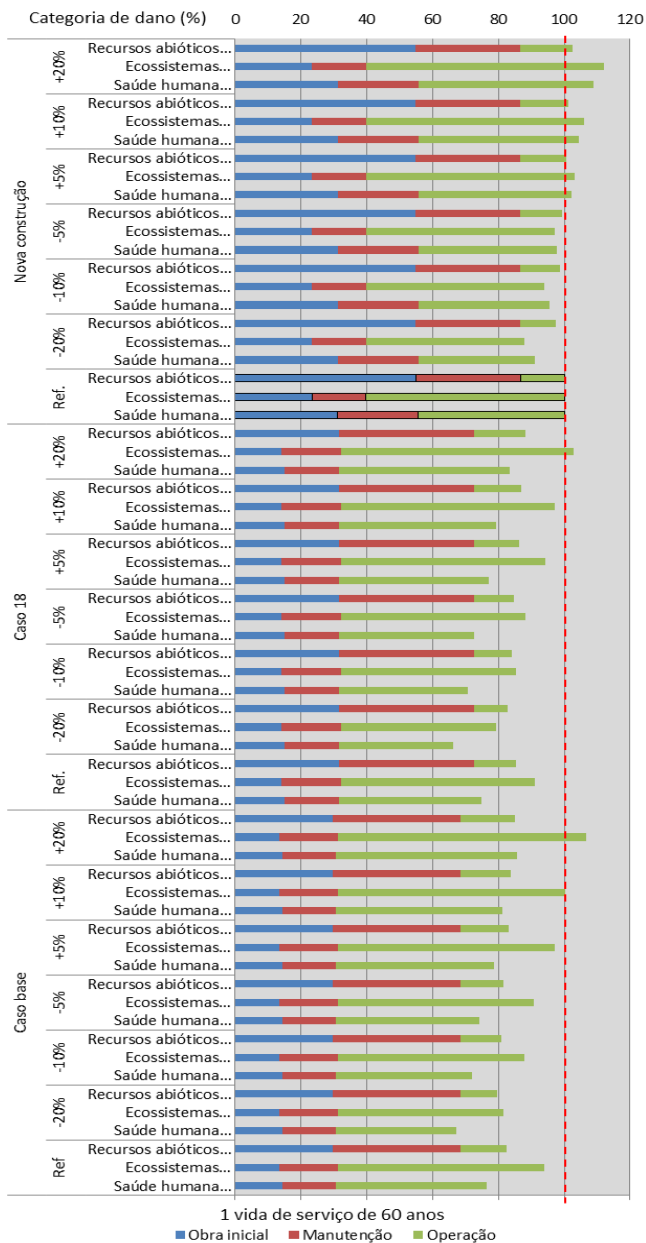


Figura 5.28 – Resultados das variações no consumo anual de energia pelas edificações de acordo com o método *ReCiPe*.

5.6.4 Variação no período da vida de serviço

Na análise de sensibilidade relativa à vida de serviço das edificações, o parâmetro temporal da unidade funcional da análise de ciclo de vida foi alterado de 60 para 30 e 120 anos. Nesta análise, as entradas para a obra inicial não são alteradas, mas os quantitativos de materiais para manutenção e de energia de operação variam. Enquanto a variação na energia para operação é proporcional, nos quantitativos para manutenção não, uma vez que uma série de componentes da edificação não precisa ser substituída antes dos 30 anos, enquanto outros passam a ser substituídos a partir dos 60 anos. Nas simulações com a unidade funcional original (vida de serviço de 60 anos), a demanda energética acumulada do Caso base era 5,82% menor que no caso do cenário com nova construção. Variando-se a vida de serviço para 30 e 120 anos, essa relação passa para -14,22% e -2,10% (Figura 5.29), respectivamente. Essa constatação é equivalente na análise de sensibilidade pelo método da Pegada Ecológica (Figura 5.30).

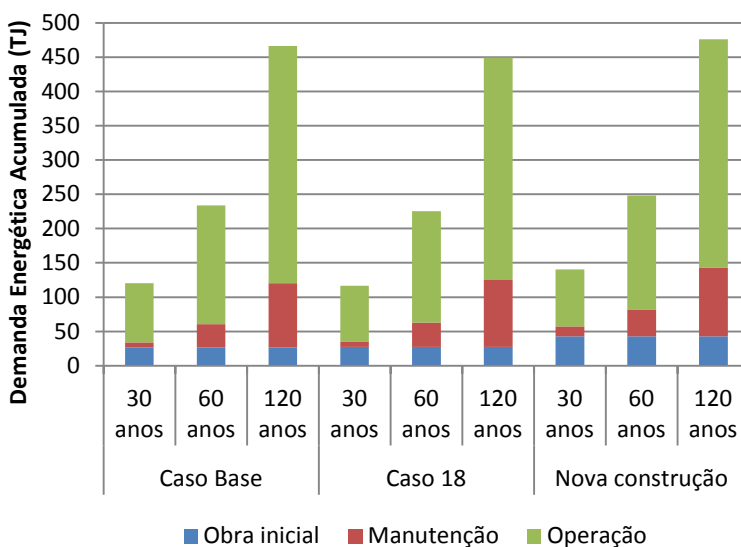


Figura 5.29 – Resultados das variações da vida de serviço das edificações pelo método da Demanda energética acumulada.

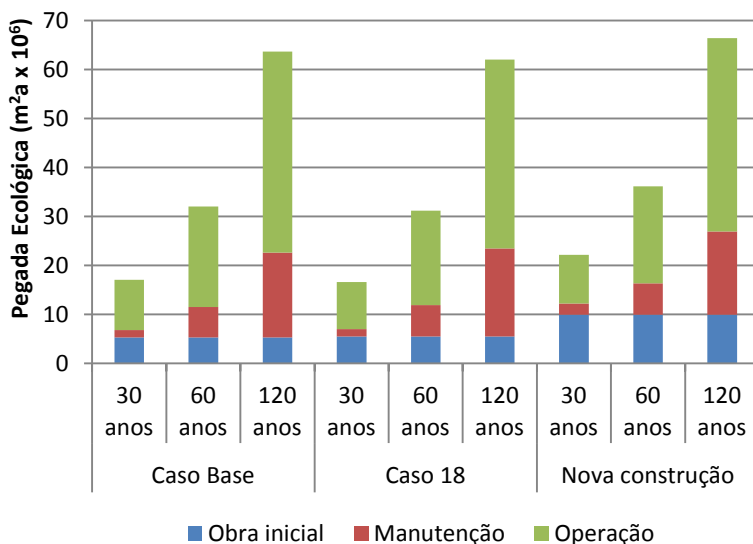


Figura 5.30 – Resultados das variações da vida de serviço das edificações pelo método da Pegada ecológica.

Assim como nos dois métodos anteriores, nas análises de sensibilidade pelo método *ReCiPe* o resultado da comparação entre o cenário com reabilitação e o cenário com nova construção não se alteraria, exceto na categoria de danos à diversidade dos ecossistemas na variação para 120 anos na vida de serviço das edificações. Uma vez mais, o responsável pelo maior impacto dos casos do cenário com reabilitação é o alumínio das esquadrias das aberturas externas. Para a vida de serviço de 120 anos, as janelas das edificações teriam que ser substituídas mais de uma vez. Na Figura 5.31 também é possível observar que a proporção dos impactos da obra inicial e da manutenção das edificações na depleção dos recursos abióticos se inverte da variação de 30 anos para a variação de 120 anos. Pode-se explicar essa constatação pelo fato de que os materiais menos duráveis (ou seja, que precisam ser substituídos mais vezes ao longo da vida de serviço da edificação) são também mais impactantes nessa categoria de danos.

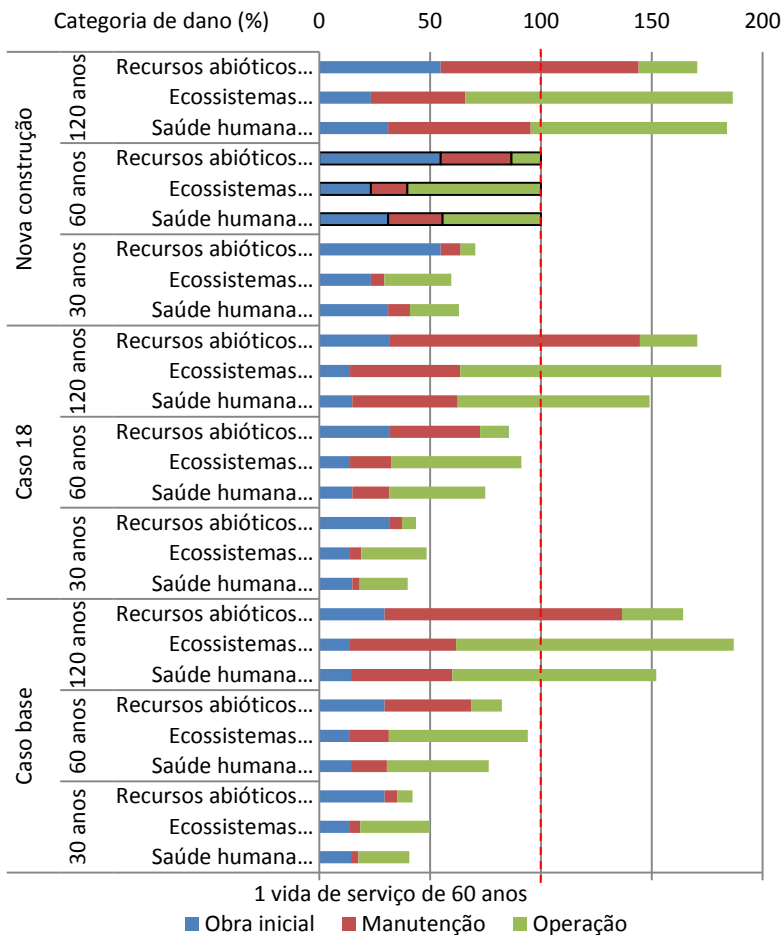


Figura 5.31 – Resultados das variações da vida de serviço das edificações pelo método *ReCiPe*.

5.7 SÍNTESE DOS RESULTADOS DO EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Os resultados confirmam as conclusões encontradas na literatura, com a fase de operação respondendo pela maior parte dos impactos no ciclo de vida das edificações. Assim, quanto maior a importância do conteúdo energético no método de avaliação de impacto de ciclo

de vida, menor é a vantagem da reabilitação sobre a nova construção. A utilização de métodos de avaliação de impacto mais completos, como o *ReCiPe*, é possível verificar que, no exemplo de aplicação, em algumas categorias de impacto do tipo *midpoint* a opção da reabilitação acarreta maiores consequências ambientais. Na análise das categorias de danos, também pelo método *ReCiPe*, esses efeitos são diluídos e a reabilitação surge como a opção com menor carga ambiental em todas as situações. Enquanto os resultados das categorias *endpoint* são de mais fácil compreensão e comunicação, a análise dos resultados das categorias *midpoint* é importante, sobretudo para se identificar possibilidades de melhorias nos projetos – tanto da nova construção quanto da reabilitação.

As análises de sensibilidade demonstraram que a utilização das TCPO e da simulação computacional termoenergética são suficientes para os objetivos do método proposto. Alterações nas avaliações ocorreram somente quando foram empregados os valores extremos – o superior para os casos com reabilitação e o inferior para o caso com nova construção – nas variações das análises de sensibilidade. Nos resultados do exemplo de aplicação, constata-se também que as análises de sensibilidade são importantes para identificar em quais processos o levantamento de dados precisa ser refinado. Este foi o caso, por exemplo, do alumínio presente nas esquadrias dos modelos do exemplo de aplicação. A participação do alumínio nos resultados finais da análise de impacto de ciclo de vida corrobora a preocupação levantada com o potencial de reciclagem pelo painel de especialistas.

6 CONCLUSÕES

A utilização da análise de ciclo de vida no âmbito da construção civil é bastante complexa. Para a avaliação de produtos mais simples – como uma caneta –, até outros mais elaborados – como um automóvel –, pode-se encontrar diretrizes e orientações suficientes nas normas e procedimentos que regem a análise de ciclo de vida. Muito provavelmente, equipes trabalhando isoladamente na avaliação de uma caneta ou de um automóvel chegariam à definição de uma mesma unidade funcional e definiriam escopos bastante parecidos para a análise de ciclo de vida. Dificilmente o mesmo aconteceria no caso de uma edificação. Afinal, geralmente, cada edifício é único; têm vida útil muito longa, podendo passar por muitas mudanças em sua forma e função ao longo de sua existência; a maior parcela de muitos dos impactos ambientais são de difícil projeção, pois ocorrem durante a fase de utilização; existem muitos intervenientes no setor da construção civil. Em uma análise de ciclo de vida em que se comparam duas edificações, sendo uma existente há décadas e outra que ainda existe só em projeto ou intenção, as complexidades são ainda maiores.

Esta pesquisa se propôs a desenvolver um método que estabelecesse diretrizes para orientar análises comparativas entre as possibilidades de se reabilitar uma edificação antiga ou de demoli-la e construir uma nova em seu lugar. Esse procedimento, que busca avaliar se a reabilitação é viável ou não, foi proposto e posteriormente avaliado por um painel de especialistas do setor. Foram estabelecidas diretrizes para a determinação da unidade funcional e das fronteiras do sistema na análise de ciclo de vida, bem como para a definição dos cenários a serem comparados e para a modelagem do inventário de ciclo de vida. Diferentes métodos de avaliação de impacto de ciclo de vida e a aplicabilidade dos seus respectivos indicadores para o setor da construção civil foram avaliados e discutidos com o painel de especialistas.

De forma geral, o método proposto foi avaliado pelos especialistas enquanto instrumento de apoio à decisão. Na modelagem dos cenários para comparação, a definição da edificação para representar o cenário com nova construção foi, como esperado, a questão mais controversa no desenvolvimento do método. A

proposição de um modelo com área construída, projeção no solo e gabarito equivalentes ao da edificação existente foi considerada adequada. Entretanto, os especialistas consultados alertaram para os impactos consequenciais dessa decisão, embora o método proposto seja essencialmente atribucional.

A definição de um modelo para a nova construção de desempenho equivalente ao nível de eficiência energética mais elevado nos Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos, o RTQ-C (MDIC/INMETRO, 2010), mostrou-se acertada. Recentemente, a Secretaria de Logística e Tecnologia da Informação do Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão publicou a Instrução Normativa nº 2, de 4 de Junho de 2014. A instrução normativa estabelece que as obras de *retrofit* de edifícios públicos federais “devem ser contratadas visando à obtenção da ENCE Parcial da Edificação Construída classe ‘A’ para os sistemas individuais de iluminação e de condicionamento de ar”. Também determina que “no caso de obra de *retrofit* da envoltória é vedado baixar a classe de eficiência existente, recomendando-se obter a maior classe possível de eficiência, observadas as restrições intransponíveis do projeto original como, por exemplo, o tombamento da edificação”. Estas mesmas diretrizes já haviam sido adotadas no desenvolvimento do método aqui proposto.

No exemplo de aplicação do método, foi avaliado o desempenho do Edifício das Diretorias, edificação modernista de interesse patrimonial situada em Florianópolis. Também foi avaliada a introdução de medidas de conservação de energia no envoltório do edifício e avaliada a viabilidade ambiental de sua reabilitação *versus* a sua hipotética demolição para a realização de uma nova construção. O modelo da nova edificação teórica, o edifício de referência de nível “A” do RTQ-C, registrou um consumo anual de energia apenas 3,83% menor que aquele simulado para o caso base, que contempla apenas o restauro do Edifício das Diretorias. Embora construído com materiais e técnicas ainda correntes, trata-se de uma edificação concebida há mais de 60 anos. Esta constatação leva a questionamentos quanto ao nível de exigência do RTQ-C em relação à qualidade do envoltório que se pretende para edificações novas e eficientes.

A maior redução no consumo de energia do Edifício das Diretorias, da ordem de 6,12%, obtida com as medidas de conservação de energia simuladas no modelo do Caso 18, pode não parecer significativa. Entretanto, há que se considerar que esta economia de energia foi alcançada apenas através de melhorias no envoltório de uma edificação que já apresentava um bom desempenho energético. Em um estudo semelhante, Nicoletti (2009) obteve uma redução 12,57% no consumo de energia com melhorias no envoltório de um edifício em Brasília, também de arquitetura modernista. O edifício analisado por Nicoletti, em sua condição inicial, foi avaliado com a etiqueta “D” pelo método prescritivo do RTQ-C e com a etiqueta “E” pelo método da simulação. Havia, portanto, uma margem de trabalho maior que aquela do Edifício das Diretorias, que foi avaliado como de etiqueta “A” pelo método da simulação do RTQ-C. Reduções ainda mais significativas no consumo de energia de edifícios existentes podem ser obtidas a partir do *retrofit* dos sistemas mecânicos e de iluminação artificial e da instalação de sistemas de controle e automação, por exemplo. Estes tipos de intervenções, que normalmente envolvem a substituição de equipamentos, são de aplicação mais simples em edifícios de valor patrimonial.

Quando considerado o desempenho ambiental, constatou-se que a introdução de medidas de conservação de energia nem sempre é vantajosa. A simples substituição da cor das fachadas do Edifício das Diretorias com vistas a reduzir a absorção térmica das paredes seria efetiva na redução do consumo de energia, sem acarretar maiores consequências ambientais. Afinal, o edifício seria necessariamente repintado na obra de restauração e possíveis diferenças no impacto ambiental seriam provocadas apenas pela utilização ou não de corantes nas tintas. Entretanto, a economia de energia obtida com a introdução de aletas de alumínio nas proteções solares existentes no Edifício das Diretorias não se justificaria do ponto de vista ambiental.

Para a realização de estudos mais aprofundados, a utilização das Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos (TCPO) como referência de quantitativos de materiais para o inventário de ciclo de vida poderia dar lugar a procedimentos baseados na análise do caso específico. Muito embora, nas análises de sensibilidade no

exemplo de aplicação do método em que se variaram os quantitativos de materiais para o inventário, os resultados das comparações na avaliação de impactos de ciclo de vida praticamente não se alteraram.

O mesmo ocorreu com a avaliação do estado de conservação do edifício existente e determinação do nível de intervenção necessário para sua restauração e para as obras futuras de manutenção – estas últimas também da edificação do cenário com nova construção. Na avaliação de impactos de ciclo de vida pelo método *ReCiPe* no exemplo de aplicação do método, constataram-se impactos significativos relacionados aos quantitativos de materiais empregados nas obras de manutenção. Entretanto, desde o princípio cuidou-se para que em nenhuma etapa do método proposto o cenário com reabilitação pudesse ser favorecido. Considerando que o objetivo do método é avaliar o impacto ambiental que pode ser evitado pela reabilitação (e não levantar o impacto da reabilitação em si), qualquer desvio na estimativa de materiais teria que ser para maior. O emprego de níveis de intervenção diferenciados somente se justificaria com a realização de levantamentos mais precisos e baseados em diagnósticos elaborados por especialistas.

A utilização de ferramentas de simulação termoenergética para a determinação do consumo de energia pelas edificações foi considerada apropriada pelos especialistas. Da mesma forma, as análises de sensibilidade variando a energia para a operação das edificações no exemplo de aplicação demonstraram que a acuracidade da simulação termoenergética é suficiente para os objetivos do método. Na realização do exemplo de aplicação, confirmou-se a expectativa de que os efeitos ambientais relacionados ao consumo de energia para a operação seriam os mais significativos no ciclo de vida das edificações.

Um aspecto importante a se destacar é que o método proposto foi desenvolvido para avaliar o impacto ambiental que seria potencialmente evitado pela reabilitação de uma edificação em face da hipótese de sua demolição e nova construção. Ou seja, processos que gerariam impactos semelhantes tanto no cenário com reabilitação quanto no cenário com nova construção foram

desconsiderados. Da mesma forma, premissas na modelagem dos cenários que pudessem favorecer a reabilitação foram contornadas. Assim, o método não se aplica para avaliar os impactos ambientais de uma obra de reabilitação em si, ou seja, só é válido enquanto comparação com uma nova construção e para avaliar potenciais impactos evitados.

6.1 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

As maiores limitações do método proposto são relacionadas a aspectos alheios aos objetivos da pesquisa, que dependem de avanços na produção do conhecimento, quais sejam:

- Inexistência de uma base de dados nacional consolidada para o inventário de ciclo de vida de materiais de construção. Os inventários já disponíveis são em sua maioria resultado de iniciativas isoladas, sobretudo fruto de pesquisas acadêmicas;
- Falta de referenciais para se determinar a vida útil das edificações. Enquanto as ainda incipientes normas de desempenho definem critérios para a durabilidade de materiais e componentes, a vida útil da edificação como um todo está sujeita a outros fatores ainda pouco estudados no Brasil;
- Ausência de dados confiáveis quanto à destinação final dos resíduos de construção e demolição, inclusive quanto ao percentual de reaproveitamento para reciclagem.

No que diz respeito à execução do exemplo de aplicação do método, o trabalho apresenta as seguintes limitações:

- Por conta de mudanças na direção do órgão governamental que ocupa o Edifício das Diretorias, no decorrer da pesquisa foi restringido o acesso a informações que seriam necessárias para a calibração do modelo da simulação termoenérgica;
- Igualmente, não foi franqueado o acesso a todos os andares do Edifício das Diretorias para a atualização do cadastro arquitetônico.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Criação de uma base de dados nacional consolidada para o inventário de ciclo de vida de materiais utilizados na construção civil;
- Realização de estudos sobre a vida útil das edificações que considerem aspectos culturais e econômicos, e não somente a durabilidade dos materiais;
- Desenvolvimento de ferramentas computacionais de análise de ciclo de vida específicos para edificações e baseados na prática construtiva nacional;
- Integração do método aqui proposto com outros métodos para a avaliação da viabilidade econômica e social da reabilitação de edificações;
- Desenvolvimento de indicadores que relacionem os resultados do método aqui proposto a mecanismos de incentivo em políticas públicas. Por exemplo, a monetização dos impactos evitados pela reabilitação poderia ser utilizada para a aquisição de potencial construtivo, dentro do instrumento de transferência do direito de construir previsto no Estatuto das Cidades.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **Desempenho térmico de edificações, NBR 15220**. Rio da Janeiro, Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005. p. 7
- ABNT. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida: Requisitos e orientações, NBR ISO 14044. Rio da Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009a.
- ABNT. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida: Princípios e estrutura, NBR ISO 14040. Rio da Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009b. p. 1-10
- ABNT. Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - Desempenho; Parte 1: Requisitos gerais, NBR 15575-1. Rio da Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013.
- ACHP. Assessing the energy conservation benefits of historic preservation: Methods and examples. Washington, D.C.: Advisory Council on Historic Preservation, 1979.
- AKTAS, C. B.; BILEC, M. M. Service life prediction of residential interior finishes for life cycle assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 6, p. 362-371, doi:10.1007/s11367-011-0367-6, 2012.
- AL-GHANDOOR, A.; JABER, J. O.; AL-HINTI, I.; MANSOUR, I. M. Residential past and future energy consumption: Potential savings and environmental impact. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 6-7, p. 1262-1274, doi:10.1016/j.rser.2008.09.008, 2009.
- ALTHAUS, H. *et al.* **Overview and Methodology: ecoinvent report Nº 1**. Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2007.
- ALVARENGA, R. A. F. De; SILVA JÚNIOR, V. P. Da; SOARES, S. R. Comparison of the ecological footprint and a life cycle impact assessment method for a case study on Brazilian broiler feed production. **Journal of Cleaner Production**, v. 28, p. 25-32, doi:10.1016/j.jclepro.2011.06.023, 2012.
- ALVES, G. da S.; ARAÚJO, N. M. C. De. Composições de custos unitários: TCPO x Apropriação in loco. In: CONNEPI 2010: V CONGRESSO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA REDE NORTE NORDESTE DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA. **Anais...** Maceió, Maceió, 17 - 19 novembro de 2010: [s.n.]. Disponível em: <<http://connepi.ifal.edu.br/ocs/index.php/connepi/CONNEPI2010/index>>, 2010.

- AMORIM, C. N. D. *et al.* Daylight as a retrofit strategy in non domestic buildings: case studies in Brasília-Brazil. In: THE 20TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE. **Anais...** Santiago, Chile: [s.n.], 2003.
- AMORIM, C. N. D. *et al.* Edifício Público Sustentável: Palácio Itamaraty. In: IX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais...** [S.l: s.n.]. Disponível em: <http://e-groups.unb.br/fau/qualilumi/artigos/ENCAC07_0049_58.pdf>. Acesso em: 14 out. 2011, 2007.
- ANELLI, R. L. S.; SANCHES, A. C. A flexibilidade da planta livre moderna para novos usos: transformando o Grande Hotel de São Carlos em Paço Municipal. In: 6º DOCOMOMO BRASIL. **Anais...** Niterói: Universidade Federal Fluminense, 2005.
- ANSI/ASHRAE. ANSI/ASHRAE Addendum a to ANSI/ASHRAE Standard 140-2001: Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2004.
- ANSI/ASHRAE. **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ASHRAE Standard 55-2010**. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2010.
- ARDENTE, F.; BECCALI, M.; CELLURA, M.; MISTRETTA, M. Energy and environmental benefits in public buildings as a result of retrofit actions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 1, p. 460–470, doi:10.1016/j.rser.2010.09.022, 2011.
- ASCIONE, F.; ROSSI, F. De; VANOLI, G. P. Energy retrofit of historical buildings: theoretical and experimental investigations for the modelling of reliable performance scenarios. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 8, p. 1925–1936, doi:10.1016/j.enbuild.2011.03.040, 2011.
- ASTM. Standard Guide for Environmental Life Cycle Assessment (LCA) of Building Materials/Products, ASTM E1991-05. Pennsylvania: American Society for Testing and Materials, 2012. p. 1–9
- ASTM. Standard Practice for Minimum Criteria for Comparing Whole Building Life Cycle, ASTM E2921-13. Pennsylvania: American Society for Testing and Materials, 2014.

- ATHENA SUSTAINABLE MATERIALS INSTITUTE. **Athena Impact Estimator for Buildings**. Disponível em: <<http://www.athenasmi.org/our-software-data/impact-estimator/>>. Acesso em: 12 fev. 2012.
- ATHENA SUSTAINABLE MATERIALS INSTITUTE; MORRISON HERSHFIELD LIMITED. **A Life Cycle Assessment Study of Embodied Effects for Existing Historic Buildings**. Merrickville: Athena Sustainable Materials Institute, 2009.
- BAEK, C.-H.; PARK, S. Policy measures to overcome barriers to energy renovation of existing buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 6, p. 3939–3947, doi:10.1016/j.rser.2012.03.046, 2012.
- BALDWINSON, T. Growth in Low-Carbon Employment and Construction SMEs : Emerging Findings from a Regional Business Assistance Project. Retrofit 2012. Manchester: University of Salford. Disponível em: <<http://www.energy.salford.ac.uk/retrofit-salford-2012>>. Acesso em: 30 mar. 2012, 2012.
- BARNHAM, B.; HEATH, N.; PEARSON, G. Historic Scotland Technical Paper 3 - Energy modelling analysis of a traditionally built Scottish tenement flat. Edinburgh: Historic Scotland/Technical Conservation Group, 2008.
- BARP, C.; MACHADO, Z.; SCHMID, A. L. Modern Architecture: rescuing passive principles for a temperate climate in Brazil. In: PLEA 2008 – 25TH CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE. **Anais...** Dublin: [s.n.], 2008.
- BIN, G. Measuring buildings for sustainability: Comparing the initial and retrofit ecological footprint of a century home-The REEP House. **Applied Energy**, doi:10.1016/j.apenergy.2011.05.055, 2011.
- BOSCO-MILLIGAN FOUNDATION. **Architectural Heritage Center**. Disponível em: <<http://www.visitahc.org/content/economics-sustainability-and-historic-preservation-with-donovan-rypkema>>. Acesso em: 25 abr. 2012.
- BPIC. **Building Products Life Cycle Inventory**. Disponível em: <<http://www.bpic.asn.au/LCI>>. Acesso em: 11 fev. 2012.
- BRANDER, M.; TIPPER, R.; HUTCHISON, C.; DAVIS, G. Consequential and Attributional Approaches to LCA: a Guide to Policy Makers with Specific Reference to Greenhouse Gas LCA of Biofuels. Technical Paper TP-090403-A. [S.l.]: ecometrica press.

- Disponível em: <www.ecometrica.co.uk>. Acesso em: 30 mar. 2012, 2009.
- BRASIL. Decreto-Lei nº 25, de 30 de novembro de 1937. Brasil: [s.n.], 1937.
- BRASIL. **Estatuto das Cidades, Lei n. 10.257, de 10 de Julho de 2001**. Brasil, Brasil: Diário Oficial - Seção 1 - Atos Poder Legislativo, Edição n.: 133 de 11/07/2001, 2001.
- BRASIL. **Déficit habitacional no Brasil 2008**. Brasília: Ministério das Cidades, 2011.
- BRITO, M. Pressupostos da reabilitação urbana de sitios historicos no contexto brasileiro. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE REABILITAÇÃO URBANA DE SÍTIOS HISTORICOS. **Anais...** Brasília, DF: [s.n.], 2002.
- BRUNO, P.; KATRIEN, P. **PRESCO WP2 Inter-comparison and Benchmarking of LCA-based Environmental Assessment and Design Tools: Final Report**. . [S.l.]: European Thematic Network on Practical Recommendations for Sustainable Construction - PRESCO. Disponível em: <<http://www.etn-presco.net>>. Acesso em: 11 fev. 2012, 2005.
- CAMERON, C. L'impact des stratégies de durabilité sur la pratique de la conservation du patrimoine. (C. Cameron & S. I. Dailoo, Eds.) In: L'IMPACT DES STRATÉGIES DE DURABILITÉ SUR LA PRATIQUE DE LA CONSERVATION DU PATRIMOINE. **Anais...** Montréal: Chaire de Recherche du Canada en Patrimoine Bâti - Faculté de l'aménagement, Université de Montréal, 2011.
- CARLO, J. C.; LAMBERTS, R. AET nº 02/04 - Elaboração de Regulamentação e Classificação de Edificações Eficientes: Processamento de arquivos climáticos para simulação do desempenho energetico de edificações. Relatório LabEEE-200504). Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis. 2005.
- CARLO, J. C.; TOCCOLINI, G.; LAMBERTS, R. Levantamento de dados visando a definição de protótipos de edificações brasileiras. [s.n.] - Florianópolis. 2005.
- CHAU, C. K.; HUI, W. K.; NG, W. Y.; POWELL, G. Assessment of CO2 emissions reduction in high-rise concrete office buildings using different material use options. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 61, p. 22-34, doi:10.1016/j.resconrec.2012.01.001, 2012.

- CLUVER, J. H.; RANDALL, B. Saving Energy in Historic Buildings: Balancing Efficiency and Value. **APT Bulletin: Journal of Preservation Technology**, v. 41, n. 1, p. 5–12, 2010.
- CORRADO, V.; BALLARINI, I.; CORGNATI, S. P.; TALÀ, N. **Typology Approach for Building Stock Energy Assessment: Building Typology Brochure – Italy**. Torino: Politecnico di Torino – Dipartimento di Energetica, Gruppo di Ricerca TEBE, 2011.
- CRAWLEY, D. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. **Energy and Buildings**, v. 33, n. 4, p. 319–331, doi:10.1016/S0378-7788(00)00114-6, 2001.
- CRAWLEY, D. B.; LAWRIE, L. K. EnergyPlus: Energy Simulation Program. **ASHRAE journal**, v. 42, n. 4, p. 49–56, 2000.
- CURRAN, M. A. Life-Cycle Assessment. p. 2168–2174, 2008.
- CURRAN, M. A.; MANN, M.; NORRIS, G. Report on the International Workshop on Electricity Data for Life Cycle Inventories. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON ELECTRICITY DATA FOR LIFE CYCLE INVENTORIES. **Anais...** Cincinnati, Ohio: National Risk Management Research Laboratory / National Renewable Energy Laboratory, 2002.
- DALKEY, N. An experimental study of group opinion: The Delphi Method. **Futures**, v. 1, n. 5, p. 408–426, doi:10.1016/S0016-3287(69)80025-X, 1969.
- DAVIS, S. J.; CALDEIRA, K.; MATTHEWS, H. D. Future CO2 Emissions and Climate Change from Existing Energy Infrastructure. **Science**, v. 329, n. September, p. 1330–1333, doi:10.1126/science.1188566, 2010.
- DODOO, A.; GUSTAVSSON, L.; SATHRE, R. Carbon implications of end-of-life management of building materials. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 53, n. 5, p. 276–286, doi:10.1016/j.resconrec.2008.12.007, 2009.
- DOE. Proceedings of the Workshop on Historic Preservation and Energy Efficiency in Federal Buildings. In: WORKSHOP ON HISTORIC PRESERVATION AND ENERGY EFFICIENCY IN FEDERAL BUILDINGS. **Anais...** Washington, DC, December 6-7, 2006 Decatur House Museum, Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2006.
- DOE. **U.S. Department of Energy - Energy Efficiency and Renewable Energy. Building Energy Software Tools Directory**. [S.l.: s.n.]. Disponível em:

- <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/>.
Acesso em: 19 maio. 2011, 2011.
- DOKA, G. Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. **ecoinvent report No. 13**. Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2009. .
- E-CONSTRUMARKET. **Guia de fornecedores construção civil**. Disponível em: <<http://www.aecweb.com.br/guia-de-fornecedores-construcao-civil>>. Acesso em: 9 dez. 2013.
- EHA. New Tricks with Old Bricks: How reusing old buildings can cut carbon emissions. London: Empty Homes Agency, 2008.
- EKINS, P.; LEES, E. The impact of EU policies on energy use in and the evolution of the UK built environment. **Energy Policy**, v. 36, n. 12, p. 4580–4583, doi:10.1016/j.enpol.2008.09.006, 2008.
- ELEFANTE, C. The Greenest Building Is... One That Is Already Built. **Forum Journal - The Journal of the National Trust for Historic Preservation**, v. 21, n. 4, 2007.
- ELETROBÁS/PROCEL; LABEEE/UFSC. **Manual de Aplicação do Regulamento Técnico da Qualidade - RTQ-C**. . [S.l.]: LabEEE/UFSC, Procel Edifica, Eletrobrás, Inmetro. Disponível em: <www.elektrobras.com>. Acesso em: 28 maio. 2012, 2012.
- ENERGY RESOURCE GROUP OF THE CENTER FOR ADVANCED COMPUTATION AT THE UNIVERSITY OF ILLINOIS AT URBANA-CHAMPAIGN; RICHARD G. STEIN & ASSOCIATES. **Energy Use for Building Construction**. New York: U.S. Department of Energy, 1976.
- EPE. **Consumo nacional de energia elétrica por classe (nacional). 1995-2011**. [S.l.]: Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <www.epe.gov.br/mercado/Paginas/Consumonacionaldeenergiaelétricaporclasse-1995-2009.aspx>. Acesso em: 28 jun. 2012, 2012.
- ERLANDSSON, M.; BORG, M. Generic LCA-methodology applicable for buildings, constructions and operation services — today practice and development needs. **Building and Environment**, v. 38, p. 919 – 938, doi:10.1016/S0360-1323(03)00031-3, 2003.
- ERLANDSSON, M.; LEVIN, P. Environmental assessment of rebuilding and possible performance improvements effect on a national scale. **Building and environment**, v. 40, n. 11, p. 1460–1471, doi:10.1016/j.buildenv.2003.05.001, 2005.

- EUROPEAN COMMISSION - EUROPEAID. **Evaluation methods for the European Union's external assistance: Evaluation tools.** Luxemburg: Office for Official Publications of the European Communities, 2006. v. 4
- EUROPEAN COMMISSION - JRC; IES. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Provisions and Action Steps. First edit ed. Luxemburg: European Commission - Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, 2010.
- EUROPEAN COMMISSION JRC; IES. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - Analysing of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment. Luxemburg: European Commission - Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, 2010.
- FALBEL, A. **Korngold: a trajetória de um arquiteto imigrante.** (Doutorado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo - São Paulo. 2003.
- FAWCETT, T.; MAYNE, R. **Exploring an “over time” model of eco-renovation. Retrofit 2012.** Manchester: University of Salford. Disponível em: <<http://www.energy.salford.ac.uk/retrofit-salford-2012>>. Acesso em: 30 mar. 2012, 2012.
- FAY, R.; TRELOAR, G.; IYER-RANIGA, U. Life-cycle energy analysis of buildings: a case study. **Building Research & Information**, v. 28, n. 1, p. 31–41, doi:10.1080/096132100369073, 2000.
- FEILDEN, B. M. **Conservation of historic buildings.** 3. ed. Oxford: Architectural Press, 2003.
- FITCH, J. M. **Historic Preservation: Curatorial Management of the Built World.** Charlottesville: University Press of Virginia, 1982.
- FREY, P. **Measuring Up : The Performance of Historic Buildings Under the Leed-NC Green Building Rating System.** (Master of Science). Historic Preservation, University of Pennsylvania - Philadelphia, PA. 2007.
- FREY, P.; ANDERSON, P.; ANDREWS, M.; WOLF, C. **Building Reuse: Finding a Place on American Climate Policy Agendas.** Washington DC: National Trust for Historic Preservation, 2008.
- GADEA, M. M. **Aplicação da análise do ciclo de vida (ACV) em uma indústria de vidro plano.** Trabalho de Conclusão de Curso

- (Graduação). Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade do Estado de Santa Catarina - Joinville. 2010.
- GEVA, A. Rediscovering Preservation: Sustainable Design Bauhaus Apartments Through in Tel Aviv. **APT Bulletin: Journal of Preservation Technology**, v. 39, n. 1, p. 43–49, 2010.
- GOEDKOOP, M.; HEIJUNGS, R.; HUIJBREGTS, M.; SCHRYVER, A. De; STRUIJS, J.; ZELM, R. Van. ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. . Netherlands: [s.n.], 2012.
- GOEDKOOP, M.; OELE, M.; SCHRYVER, A. De; VIEIRA, M.; PRÉ CONSULTANTS; HEGGER, S. **SimaPro 7 Database Manual. Methods library**. The Netherlands: PRé Consultants. Disponível em: <www.pre.nl>. Acesso em: 20 ago. 2012, 2010.
- GOLDSTEIN, D. B.; BURT, L.; HORNER, J.; ZIGELBAUM, N. Zeroing in on Net-Zero Buildings: Can We Get There? How Will We Know When We Have Arrived? In: 2010 ACEEE SUMMER STUDY ON ENERGY EFFICIENCY IN BUILDINGS. **Anais...** Washington, D.C.: American Council for an Energy-Efficient Economy. Disponível em: <<http://www.aceee.org/conferences/2010/ssb>>, 2010.
- GORGOLEWSKI, M. Ecological Building. (C. Quinn, Ed.)In: HERITAGE AND SUSTAINABILITY: CANADIAN COMMUNITIES AND KYOTO, HERITAGE CANADA FOUNDATION ANNUAL CONFERENCE,, **Anais...** Regina, Saskatchewan, September 15; 16; 17; 2005 Regina; Saskatchewan; The Heritage Canada Foundation, 2005.
- GOUVEIA, S. M. M. A fotografia de arquitetura de Peter Scheier em três publicações: Panorama da fotografia em Brazil Builds, Latin American Architecture e Modern Architecture in Brazil. In: 8º SEMINÁRIO DOCOMOMO BRASIL. **Anais...** Rio de Janeiro: Docomomo Brasil. Disponível em: <http://www.revistasusp.sibi.usp.br/scielo.php?script=sci_text&pid=S1518-95542008000200006>. Acesso em: 25 abr. 2012, 2009.
- GUNN, C. Exploring the connection between built and natural heritage. Ottawa: Heritage Canada Foundation, 2001.
- HAAPIO, A.; VIITANIEMI, P. A critical review of building environmental assessment tools. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 28, n. 7, p. 469–482, doi:10.1016/j.eiar.2008.01.002, 2008.

- HAMMOND, G.; JONES, C. **Inventory of Carbon and Energy. ICE**. Bath: Sustainable Energy Research Team, University of Bath. Disponível em: <<http://wiki.bath.ac.uk/display/ICE/Home+Page>>. Acesso em: 6 fev. 2012, 2011.
- HENNINGER, R. H.; WITTE, M. J. **EnergyPlus Testing with ANSI/ASHRAE Standard 140-2001 (BESTEST)**. Berkeley, CA: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, U.S. Department of Energy, 2004.
- HENSEN, J. L. M.; DJUNAEDY, E.; RADOŠEVIĆ, M.; YAHIAOUI, A. Building Performance Simulation for better design: some issues and solutions. In: PLEA2004 - THE 21TH CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE,. **Anais...** Eindhoven, The Netherlands, Eindhoven, The Netherlands, 19 - 22 September 2004: PLEA, 2004.
- HIROYAMA, E. H. **A Dimensão Urbana da Arquitetura Moderna em São Paulo: Habitação coletiva e espaço urbano 1938/1972**. (Mestrado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo - São Paulo. 2010.
- HIRSCHFELD, H. **Engenharia Econômica e Análise de Custos**. 7. ed. [S.l.]: Editora Atlas, 2000. p. 519
- HISCHIER, R. *et al.* Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods: ecoinvent report No. 3, v2.2. Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2010.
- HOUSE OF COMMONS. The Role of Historic Buildings in Urban Regeneration: Eleventh Report of Session 2003 – 04. London: The Stationery Office Limited, 2004.
- HUIJBREGTS, M. a. J.; HELLWEG, S.; FRISCHKNECHT, R.; HUNGERBÜHLER, K.; HENDRIKS, a. J. Ecological footprint accounting in the life cycle assessment of products. **Ecological Economics**, v. 64, n. 4, p. 798–807, doi:10.1016/j.ecolecon.2007.04.017, 2008.
- IBGE. **Resultados do Censo 2010**. Disponível em: <www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_impresso.php?id_noticia=1766>. Acesso em: 1 nov. 2011.
- IBICT. Metodologia Padrão para Elaboração de Inventários de Ciclo de Vida da Indústria Brasileira – Documento Consolidado. Projeto “SICV Brasil – Sistema de Inventários do Ciclo de Vida Brasil.” [S.l.]: Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e

- Tecnologia. Disponível em: <<http://acv.ibict.br/publicacoes/documentos-tecnicos>>, 2009.
- IEA. **World Energy Outlook 2011**. Paris: International Energy Agency, 2011.
- IEA ANNEX 31. **Assessing Buildings for Adaptability. Energy-Related Environmental Impact of Buildings**. [S.l.]: Canada Mortgage and Housing Corporation. Disponível em: <www.annex31.org>. Acesso em: 13 fev. 2012a, 2001.
- IEA ANNEX 31. **Environmental Framework. Energy-Related Environmental Impact of Buildings**. [S.l.]: International Energy Agency. Disponível em: <www.annex31.org>. Acesso em: 30 mar. 2012b, 2001.
- IEA ANNEX 31. **LCA Methods for buildings. Energy-Related Environmental Impact of Buildings**. [S.l.]: International Energy Agency. Disponível em: <www.annex31.org>. Acesso em: 30 mar. 2012c, 2001.
- IEA ANNEX 31. Directory of Tools: A Survey of LCA Tools, Assessment Frameworks, Rating Systems, Technical Guidelines, Catalogues, Checklists and Certificates. Energy-Related Environmental Impact of Buildings. [S.l.]: International Energy Agency. Disponível em: <www.annex31.org>. Acesso em: 13 fev. 2012d, 2001.
- IEA ANNEX 31. **IEA Annex 31. Energy-Related Environmental Impact of Buildings**. [S.l.]: Canada Mortgage and Housing Corporation. Disponível em: <www.annex31.org>. Acesso em: 13 fev. 2012a, 2004.
- IEA ANNEX 31. **Sensitivity and Uncertainty. Energy-Related Environmental Impact of Buildings**. [S.l.]: Canada Mortgage and Housing Corporation. Disponível em: <www.annex31.org>. Acesso em: 13 fev. 2012b, 2004.
- IFU HAMBURG GMBH. **Umberto**. Disponível em: <www.umberto.de>. Acesso em: 13 dez. 2012.
- ILO. Green Jobs Creation Through Sustainable Refurbishment in the Developing Countries. Geneva, Switzerland: International Labour Organization, 2010.
- IPCC. Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.

- ISO. Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, ISO 7730:2005. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2005.
- ITARD, L.; KLUNDER, G. Comparing environmental impacts of renovated housing stock with new construction. **Building Research & Information**, v. 35, n. 3, p. 252–267, doi:10.1080/09613210601068161, 2007.
- IYER-RANIGA, U.; WONG, J. P. C. Evaluation of whole life cycle assessment for heritage buildings in Australia. **Building and Environment**, v. 47, p. 138–149, doi:10.1016/j.buildenv.2011.08.001, 2012.
- JACKSON, M. Embodied energy and historic preservation: A needed reassessment. **APT Bulletin: Journal of Preservation Technology**, v. 36, n. 4, p. 47–52, 2005.
- JACKSON, M. Green Home-Rating Systems: A Preservation Perspective. **APT Bulletin: Journal of Preservation Technology**, v. 41, n. 1, p. 13–18, 2010.
- JACOBS, J. **Death and Life of Great American Cities**. Westminster, MD, USA: Vintage, 1992. p. 1–474
- JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Tese (Livre Docência). Escola Politecnica, Universidade de São Paulo - São Paulo. 2000.
- JUDKOFF, R.; NEYMARK, J. Model Validation and Testing: The Methodological Foundation of ASHRAE Standard 140 - Preprint. In: ASHRAE 2006 ANNUAL MEETING. **Anais...** Quebec City, Quebec City, Canada June 24–29, 2006: 2006 Annual Meeting, 2006.
- KAVENAGH, C. Waste Disposal Issues for the Restoration of Building Facades. In: KELLEY, S. J. (Ed.). **Standards for Preservation and Rehabilitation, ASTM STP 1258**. Dallas/Fort Worth: American Society for Testing and Materials, 1996. .
- KHASREEN, M. M.; BANFILL, P. F. G.; MENZIES, G. F. Life-Cycle Assessment and the Environmental Impact of Buildings: A Review. **Sustainability**, v. 1, n. 3, p. 674–701, doi:10.3390/su1030674, 2009.

- KLÜPPEL, G. P. Aspects of the Tropical Climate Adaptation in Brazilian Modern Movement Architecture. **Docomomo Journal**, p. 84–91, 2006.
- KOHLER, N.; HASSLER, U. The building stock as a research object. **Building Research and Information**, v. 30, n. 4, p. 226–236, doi:10.1080/09613210110102238, 2002.
- KOHLER, N.; LÜTZKENDORF, T. Integrated life-cycle analysis. **Building Research & Information**, v. 30, n. 5, p. 338–348, doi:10.1080/09613210110117584, 2002.
- KOHLER, N.; MOFFATT, S. Life-cycle analysis of the built environment. **UNEP Industry And Environment**, p. 17–21, 2003.
- KÜHL, B. M. O tratamento das superfícies arquitetônicas como problema teórico da restauração. **Anais do Museu Paulista: História e Cultura Material**, v. 12, n. 1, p. 309–330, doi:10.1590/S0101-47142004000100021, 2004.
- KÜHL, B. M. Preservação do Patrimônio Arquitetônico da Industrialização: problemas teóricos de restauro. Cotia, SP: Ateliê Editorial, 2008.
- LABEEE/UFSC. **S3E Simulador Eficiência Energética em Edificações**. Disponível em: <<http://www.s3e.ufsc.br>>. Acesso em: 19 out. 2011.
- LAEFER, D. F.; MANKE, J. P. Building Reuse Assessment for Sustainable Urban Reconstruction. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 134, n. 3, p. 217, doi:10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:3(217), 2008.
- LAMBERTS, R.; GHISI, E.; RAMOS, G. Impactos da Adequação Climática Sobre a Eficiência Energética e o Conforto Térmico de Edifícios de Escritórios no Brasil. . Florianópolis: [s.n.], 2006.
- LANGE, M. V; UGAYA, C. M. L. Perda da Biodiversidade Devida ao Impacto Climático do Uso do Solo na ACV: Estudo de Caso de Regionalização de Dados de Transferência de Carbono na Mata Atlântica. In: 3RD INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION. **Anais...** São Paulo: [s.n.], 2011.
- LEE, B.; TRCKA, M.; HENSEN, J. Embodied energy of building materials and green building rating systems — A case study for industrial halls. **Sustainable Cities and Society**, p. 5–9, doi:10.1016/j.scs.2011.02.002, 2010.
- LEIBRECHT, S. Fundamental Principles for CAD-based Ecological Assessments. **The International Journal of Life Cycle**

- Assessment**, v. 10, n. 6, p. 436-444, doi:10.1065/lca2005.08.217, 2005.
- LIEUX PATRIMONIAUX DU CANADA. **Normes et lignes directrices pour la conservation des lieux patrimoniaux au Canada**. 2. ed. Ottawa, Canada: Sa Majesté la reine du chef du Canada, 2010.
- LOWE, R. Technical options and strategies for decarbonizing UK housing. **Building Research & Information**, v. 35, n. 4, p. 412-425, doi:10.1080/09613210701238268, 2007.
- LUCUIK, M.; TRUSTY, W.; HUFFMAN, A.; PREFASI, A. The Greenest Building Is the One That Is Never Built: A Life-Cycle Assessment Study of Embodied Effects for Historic Buildings. In: ASHRAE BUILDINGS XI CONFERENCE. **Anais...** Clearwater Beach, Florida: ASHRAE, 2010.
- LYONS, T. J.; REYNOLDS, M. H. Exposure to Hazardous Materials During Renovation for Existing Structures. In: KELLEY, S. J. (Ed.). **Standards for Preservation and Rehabilitation, ASTM STP 1258**. Dallas/Fort Worth: American Society for Testing and Materials, 1996. p. 401-417.
- MANSFIELD, J. Sustainable refurbishment: policy direction and support in the UK. **Structural Survey**, v. 27, n. 2, p. 148-161, doi:10.1108/02630800910956470, 2009.
- MAREN, J. VAN DER. **La recherche appliquée en Pédagogie: Des modèles pour l'enseignement**. 2. ed. [S.l.]: De Boeck Supérieur, 2003. p. 264
- MASON, R. **Economics and Historic Preservation: A guide and review of the literature**. . Washington, D.C.: The Brookings Institution. Disponível em: <www.brookings.edu/metro>, 2005.
- MATHERS, C.; VOS, T.; LOPEZ, A.; SALOMON, J.; EZZATI, M. National Burden of Disease Studies: A Practical Guide. Edition 2.0. Global Program on Evidence for Health Policy. Geneva: World Health Organization, 2001.
- MCKENNA, M. T.; ZOHRABIAN, A. U.S. burden of disease - past, present and future. **Annals of epidemiology**, v. 19, n. 3, p. 212-9, doi:10.1016/j.jannepidem.2008.11.005, 2009.
- MDIC/CONMETRO. Resolução no 04, de 15 de dezembro de 2010. Anexo: Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida - PBACV: Detalhamento. [S.l: s.n.], 2010.
- MDIC/CONMETRO. Resolução no 01, de 16 de maio 2012. Anexo: Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida - Plano de Ação Quadrienal 2012-2015. [S.l: s.n.], 2012.

- MDIC/INMETRO. Portaria nº 372 de 17 de setembro de 2010. Anexo: Volume 2 - Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos. Rio de Janeiro: Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior/Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. Disponível em: <www.eletrobras.com>. Acesso em: 28 maio. 2012, 2010.
- MELENDI, J. M. A. Da janela horizontal ao brise-soleil de Le Corbusier: análise ambiental da solução proposta para o Ministério da Educação de Rio de Janeiro. **Arquitextos**, n. 051.01, 2004.
- MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; CUNHA NETO, J. A. B. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. **Ambiente Construído**, v. 5, n. 4, p. 47–68, 2008.
- MENZIES, G. F. Historic Scotland Technical Paper 13: Embodied energy considerations for existing buildings. Edinburgh: Historic Scotland/ALBA AOSMHOR, 2011.
- MINKU, P. M. **Tipologias construtivas de edifícios de escritório na cidade de Florianópolis**. Relatório final de iniciação científica. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações – LabEEE. Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis. 2005.
- MME. **Plano Nacional de Eficiência Energética (PNE)**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2011.
- MURRAY, S. N.; ROCHER, B.; O’SULLIVAN, D. T. J. Static Simulation: A sufficient modelling technique for retrofit analysis. **Energy and Buildings**, v. 47, p. 113–121, doi:10.1016/j.enbuild.2011.11.034, 2011.
- NES. **National Energy Services**. Disponível em: <www.nesltd.co.uk/>. Acesso em: 9 fev. 2012.
- NICOLETTI, A. M. A. **Eficiência Energética em um Ministério da Esplanada em Brasília: Propostas para um retrofit de envoltória**. (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília - Brasília. 2009.
- NIST. **BEES 2.0. Building for Environmental and Economic Sustainability**. Gaithersburg: U.S. Department of Commerce - National Institute of Standards and Technology, 2011.

- NREL. **OpenStudio**. . Denver, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy. Disponível em: <<http://openstudio.nrel.gov/>>, 2012.
- NTHP. The Greenest Building: Quantifying the environmental value of building reuse. Seattle: National Trust for Historic Preservation, 2012.
- OECD. **OECD Environmental Outlook to 2050**. [S.l.]: OECD Publishing, 2012.
- ONU. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Kyoto: Secretary-General of the United Nations, 1998.
- ORTIZ, O.; CASTELLS, F.; SONNEMANN, G. Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 1, p. 28–39, doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.11.012, 2009.
- PACHECO, R.; ORDÓÑEZ, J.; MARTÍNEZ, G. Energy efficient design of building: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 6, p. 3559–3573, doi:10.1016/j.rser.2012.03.045, 2012.
- PE INTERNATIONAL. **GaBi**. Disponível em: <www.gabi-software.com>. Acesso em: 13 dez. 2012.
- PETERSDORFF, C.; BOERMANS, T.; HARNISCH, J. Mitigation of CO2 emissions from the EU-15 building stock: beyond the EU Directive on the Energy Performance of Buildings. **Environmental science and pollution research international**, v. 13, n. 5, p. 350–8, 2006.
- PINHEIRO, J. de Q.; FARIAS, T. M.; ABE-LIMA, J. Y. Painel de Especialistas e Estratégia Multimétodos: Reflexões, Exemplos, Perspectivas. **Psico**, v. 44, n. 2, p. 184–192, 2013.
- PINTO, T. de P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - São Paulo. 1999.
- PORTO, M. M.; FONSECA, I.; ROCHA, A. B.; RAMAZZINI, L.; BARBOSA, E.; LIMA, T. A Iluminação Natural na Modelagem do Espaço: O Prédio do MEC no Rio de Janeiro. In: GAZZANEO, L. M. C. (Ed.). **A República no Brasil 1889-2003: ideário e realizações. Volume I - Arquitetura**. Brasil: Papel Virtual Editora, 2009. p. 188–205.

- POWER, A. Does demolition or refurbishment of old and inefficient homes help to increase our environmental, social and economic viability? **Energy Policy**, v. 36, n. 12, p. 4487–4501, doi:10.1016/j.enpol.2008.09.022, 2008.
- POWER, A. Housing and sustainability: demolition or refurbishment? **Urban Design and Planning**, v. 163, n. 4, p. 205–216, doi:10.1680/udap.2010.163.4.205, 2010.
- POWTER, A.; ROSS, S. Integrating Environmental and Cultural Sustainability for Heritage Properties. **APT Bulletin: Journal of Preservation Technology**, v. 36, n. 4, p. 5–11, 2005.
- PRÉ CONSULTANTS. **SimaPro**. Disponível em: <<http://www.pre-sustainability.com/content/simapro-lca-software>>. Acesso em: 13 fev. 2012.
- QUANTIS. Quantifying the Value of Building Reuse: A Life Cycle Assessment of Rehabilitation and New Construction. Prepared for: The National Trust for Historic Preservation. [S.l.]: The National Trust for Historic Preservation. Disponível em: <www.preservationnation.org/issues/sustainability/green-lab/>. Acesso em: 2 fev. 2012, 2012.
- RAMESH, T.; PRAKASH, R.; SHUKLA, K. K. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 10, p. 1592–1600, doi:10.1016/j.enbuild.2010.05.007, 2010.
- RAVETZ, J. State of the stock — What do we know about existing buildings and their future prospects? **Energy Policy**, v. 36, p. 4462–4470, doi:10.1016/j.enpol.2008.09.026, 2008.
- REITER, S. Life Cycle Assessment of Buildings – a review. In: ARCELORMITTAL INTERNATIONAL NETWORK IN STEEL CONSTRUCTION: SUSTAINABILITY WORKSHOP AND THIRD PLENARY MEETING. **Anais...** Bruxelles: ORBi Open Repository and Bibliography, 2010.
- RENPING, W.; ZHENYU, C. An ecological assessment of the vernacular architecture and of its embodied energy in Yunnan, China. **Building and Environment**, v. 41, n. 5, p. 687–697, doi:10.1016/j.buildenv.2005.02.023, 2006.
- RIBEIRO, M. B. Conforto ambiental em prédios de valor cultural. In: CORREIA, M. R. (Ed.). **Oficina de estudos da preservação, Coletânea I**. Rio de Janeiro: IPHAN-Rio, 2008. .
- RODWELL, D. **Conservation and Sustainability in Historic Cities**. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd, 2007.

- ROLFSMAN, B. CO2 emission consequences of energy measures in buildings. **Building and Environment**, v. 37, n. 12, p. 1421–1430, doi:10.1016/S0360-1323(01)00114-7, 2002.
- RYPKEMA, D. D. Economics, Sustainability, and Historic Preservation. **Forum Journal - The Journal of the National Trust for Historic Preservation**, p. 27–38, 2006.
- SABOYA, R. T. De. Fundamentos conceituais para uma teoria do planejamento urbano baseada em decisões. **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 5, n. 2, p. 81–95, 2013.
- SAIBROSA, J.; AMORIM, C. N. D. Public Offices Buildings in Brasília: a point of view of Environmental Comfort. In: PLEA2006 - THE 23RD CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE. **Anais...** Geneva: [s.n.], 2006.
- SANTANA, M. V. **Influência de parâmetros construtivos no consumo de energia de edifícios de escritório localizados em Florianópolis - SC**. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis. 2006.
- SARTORI, I.; HESTNES, a. Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. **Energy and Buildings**, v. 39, n. 3, p. 249–257, doi:10.1016/j.enbuild.2006.07.001, 2007.
- SATTLER, M. A.; KUHN, E. A.; SOUZA, D. T. P. De. Embodied Energy in Wall Subsystems of More Sustainable Buildings. In: 26TH CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE. **Anais...** Quebec City: ULaval, 2009.
- SDC. **“Stock Take”: Delivering improvements in existing housing**. London: The Sustainable Development Commission, 2006.
- SEDOVIC, W.; GOTTHELF, J. H. What Replacement Windows Can’t Replace: The Real Cost of Removing Historic Windows. **APT Bulletin: Journal of Preservation Technology**, v. 36, n. 4, p. 25–29, 2010.
- SEGAWA, H. **Arquiteturas no Brasil: 1900-1990**. 2. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1999.
- SEGRE, R.; VILAS BOAS, N.; LEITÃO, T. O Ministério da Educação e Saúde Pública (1935-1945): As inovações climáticas e tecnológicas. In: 8º SEMINÁRIO DOCOMOMO BRASIL. **Anais...** Rio de Janeiro: Docomomo Brasil. Disponível em:

- <http://www.docomomo.org.br/seminario_8_pdfs/149.pdf>, 2009.
- SEMLALI, A. **Moyens Informatiques de restitution en archéologie monumentale: Cas du temple de Karnak.** (Thèse). École d'architecture - Faculté de l'aménagement, Université de Montréal - Montréal, QC. 2009.
- SEV; SBR. **EcoQuantum woningbouw versie 2.** . Rotterdam: SEV and SBR, 2002.
- SHARMA, A.; SAXENA, A.; SETHI, M.; SHREE, V. Life cycle assessment of buildings: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 1, p. 871–875, doi:10.1016/j.rser.2010.09.008, 2011.
- SOARES, S. R. Conception et évaluation d'un système à base de connaissances pour l'élimination de déchets. (Thèse) Institut National des Sciences Appliquées de Lyon - Lyon. 1994.
- SOARES, S. R.; SOUZA, D. M. De; PEREIRA, S. W. A avaliação do ciclo de vida no contexto da construção civil. In: SATTLER, M. A.; PEREIRA, F. O. R. (Eds.). **Coletânea Habitar - vol. 7 - Construção e Meio Ambiente.** Porto Alegre: ANTAC, 2006. .
- SPERB, M. R. **Avaliação de tipologias habitacionais a partir da caracterização de impactos ambientais relacionados a materiais de construção.** (Dissertação). Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre. 2000.
- SPYROPOULOS, G. N.; BALARAS, C. A. Energy consumption and the potential of energy savings in Hellenic office buildings used as bank branches—A case study. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 4, p. 770–778, doi:10.1016/j.enbuild.2010.12.015, 2011.
- STOVEL, H. Reconciling sustainability and conservation: an unexpectedly long road. (C. Cameron & S. I. Dailoo, Eds.) In: L'IMPACT DES STRATÉGIES DE DURABILITÉ SUR LA PRATIQUE DE LA CONSERVATION DU PATRIMOINE. **Anais...** Montréal: Chaire de Recherche du Canada en Patrimoine Bâti - Faculté de l'aménagement, Université de Montréal, 2011.
- STURGIS, S.; ROBERTS, G. Redefining Zero: Carbon profiling as a solution to whole life carbon emission measurement in buildings. London: Royal Institution of Chartered Surveyors, 2010.
- SUH, S.; LIPPIATT, B. Framework for hybrid life cycle inventory databases: a case study on the Building for Environmental and Economic Sustainability (BEES) database. **The International**

- Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, p. 604–612, doi:10.1007/s11367-012-0393-z, 2012.
- SZABO, L. P.; FRETIN, D.; SALADO, G. D. C.; MARTINELLI, L.; CORRÊA, P.; MÜLFARTH, R. K. São Paulo Modern Architecture: A pioneering experience in sustainability matters. In: 21TH CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE - PLEA2004. **Anais...** The Netherlands: [s.n.], 2004.
- TABORIANSKI, V. M.; PRADO, R. T. a. Methodology of CO2 emission evaluation in the life cycle of office building facades. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 33, n. 1, p. 41–47, doi:10.1016/j.eiar.2011.10.004, 2012.
- TAMANINI JUNIOR, T. **Modelo predominante de edifícios de escritórios para análise energética em Florianópolis**. Relatório final de iniciação científica. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações – LabEEE. Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis. 2013.
- TAVARES, S. F.; LAMBERTS, R. Determinação da energia embutida em edificações: um atributo de sustentabilidade. In: ENTAC 2006 - XI ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 2006.
- TAYLOR, J.; BLADES, N.; CASSAR, M.; RIDLEY, I. Reviewing past environments in a historic house library using building simulation. (I. Verger *et al.*, Eds.) In: PREPRINTS OF THE ICOM COMMITTEE FOR CONSERVATION 14TH TRIENNIAL MEETING. **Anais...** London: James & James, 2005.
- TAYLOR, J. G.; ZUBE, E. H.; SELL, J. ames L. Landscape assessment and perception research methods. In: BECHTEL, R. B.; MARANS, R. W.; MICHELSON, W. (Eds.). **Methods in environmental and behavioral research**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1987. p. 361–393.
- TCPO. Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos - TCPO 2. 14ª. ed. São Paulo: Pini, 1961.
- TCPO. Tabelas de composições de preços para orçamentos - TCPO 13. 13ª. ed. São Paulo: Pini, 2010.
- TECHNICAL ADVISORY COMMITTEE OF THE HERITAGE COUNCIL OF VICTORIA. **Heritage Buildings and energy efficiency Regulations**. [S.l.]: Heritage Council of Victoria, 2009. p. 1–8
- TEIXEIRA, L. E. F.; GRAD, G. F. Arquiteturas da modernidade em risco: dois casos em Florianópolis. In: 9º SEMINÁRIO DOCOMOMO BRASIL: INTERDISCIPLINARIDADE E

- EXPERIÊNCIAS EM DOCUMENTAÇÃO E PRESERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO RECENTE. **Anais...** Brasília, DF: Docomomo. Disponível em: <www.docomomobsb.org>, 2011.
- THE ROYAL SOCIETY OF CANADA. **Expert panels: Manual of procedural guidelines**. . [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://rsc.ca/en/expert-panels/information-about-expert-panels>>. Acesso em: 26 dez. 2013, 2010.
- THOMSEN, A.; FLIER, K. Van der. Obsolescence and the end of life phase of buildings. In: MANAGEMENT AND INNOVATION FOR A SUSTAINABLE BUILT ENVIRONMENT. **Anais...** 20 – 23 June 2011, Amsterdam, The Netherlands: [s.n.], 2011.
- TINEM, N. Arquitetura Moderna Brasileira: a imagem como texto. **Arquitextos**, n. 06.072, p. 1–10, 2006.
- TOMMERUP, H.; SVENDSEN, S. Energy savings in Danish residential building stock. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 6, p. 618–626, doi:10.1016/j.enbuild.2005.08.017, 2006.
- TRUSTY, W. Renovating vs. Building New: The Environmental Merits. In: OECD/IEA JOINT WORKSHOP ON SUSTAINABLE BUILDINGS: TOWARDS SUSTAINABLE USE OF BUILDING STOCK. **Anais...** Tokyo: Organization for Economic Cooperation and Development, 2004.
- TRUSTY, W. L'aspect environnemental de la durabilité : l'analyse du cycle de vie pour l'évaluation de la performance réelle. In: REGARD SUR LA SCIENCE DU BÂTIMENT 2006 : INFRASTRUCTURES DURABLES: TECHNIQUES, OUTILS ET GUIDES. **Anais...** Canada: NRC Institute for Research in Construction; National Research Council Canada, 2006.
- TRUSTY, W. Misconceptions and Misunderstanding about LCA. **International Code Council Building Safety Journal Online**, n. December, p. 12–15, 2010.
- TRUSTY, W.; ARGELES, C. An Empirical Perspective on Building Durability. **Environmental Expert**, 2005.
- TUCKER, S. N.; TRELOAR, G. J.; CSIRO. **Energy embodied in construction and refurbishment of buildings**. [S.l.]: CSIRO. Division of Building, Construction and Engineering, 1994.
- TWEED, C.; SUTHERLAND, M. Built cultural heritage and sustainable urban development. **Landscape and Urban Planning**, v. 83, n. 1, p. 62–69, doi:10.1016/j.landurbplan.2007.05.008, 2007.
- U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR. **The Secretary of the Interior's Standards for Rehabilitation and Guidelines for**

- Rehabilitating Historic Buildings.** Washington, D.C.: U.S. Department of the Interior, National Park Service, Preservation Assistance Division, 1990.
- U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **Annual Energy Review 2010. Energy.** Washington, DC: U.S. Department of Energy/Office of Energy Statistics/U.S. Energy Information Administration, 2011.
- UN-HABITAT. **UN-HABITAT. Second United Nations Conference on Human Settlements (HABITAT II).** Istanbul, Turkey: The United Nations Human Settlements Programme. Disponível em: <http://www.unhabitat.org/declarations/habitat_agenda.htm>. Acesso em: 9 nov. 2011, 1996.
- UNITED NATIONS BRUNTLAND COMMISSION. **Our common future, Report of the World Commission on Environment and Development.** Geneva, Switzerland: World Commission on Environment and Development, 1987.
- UNITED NATIONS CONFERENCE ON SUSTAINABLE DEVELOPMENT - RIO+20. **The future we want. Outcome of the Conference.** Rio da Janeiro: United Nations. Disponível em: <<http://www.un.org/en/sustainablefuture/>>. Acesso em: 18 jul. 2012, 2012.
- WATSON, P.; JONES, D. Redefining life cycle for a building sustainability assessment framework. In: SUSTAINABILITY MEASURES FOR DECISION-SUPPORT - FOURTH AUSTRALIAN LIFE CYCLE ASSESSMENT CONFERENCE. **Anais...** Sydney: Queensland University of Technology, 2005.
- WEIDEMA, B. P. The Integration of Economic and Social Aspects in Life Cycle Impact Assessment. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 11, n. 1, p. 89–96, 2006.
- WEIDEMA, B. P. Using the budget constraint to monetarise impact assessment results. **Ecological Economics**, v. 68, n. 6, p. 1591–1598, doi:10.1016/j.ecolecon.2008.01.019, 2009.
- WORTMAN, P. M. Consensus Panels: Methodology. **International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences.** [S.l.]: Elsevier, 2001..
- YOUNG, R. A. Historic preservation and adaptive use: a significant opportunity for sustainability. In: ARCHITECTURE RESEARCH CENTERS CONSORTIUM, ARCC 2011, SPRING CONFERENCE. **Anais...** Detroit: [s.n.], 2011.

- ZAMAGNI, A.; GUINÉE, J.; HEIJUNGS, R.; MASONI, P.; RAGGI, A. Lights and shadows in consequential LCA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 7, p. 904-918, doi:10.1007/s11367-012-0423-x, 2012.
- ZANCHETI, S. M.; HIDAKA, L. T. F. Measuring Urban Heritage Conservation: Theory and Structure (Part 1). **Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development**, v. 1, n. 2, 2011.
- ZANCHETI, S. M.; HIDAKA, L. T. F. Measuring urban heritage conservation: indicator, weights and instruments (part 2). **Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development**, v. 2, n. 1, p. 15-26, doi:10.1108/20441261211223243, 2012.
- ZHAO, H.; MAGOULÈS, F. A review on the prediction of building energy consumption. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 6, p. 3586-3592, doi:10.1016/j.rser.2012.02.049, 2012.
- Estadão. Edifício Ariona cede lugar ao progresso.** São Paulo: [s.n.]. Disponível em: <www.estadao.com.br>. Acesso em: 27 abr. 2012, 2001.

APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO DE CONSULTA AO PAINEL DE ESPECIALISTAS

BENEFÍCIOS AMBIENTAIS DA PRESERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO EDIFICADO:

Análise do ciclo de vida da reabilitação de edificações vs. nova construção

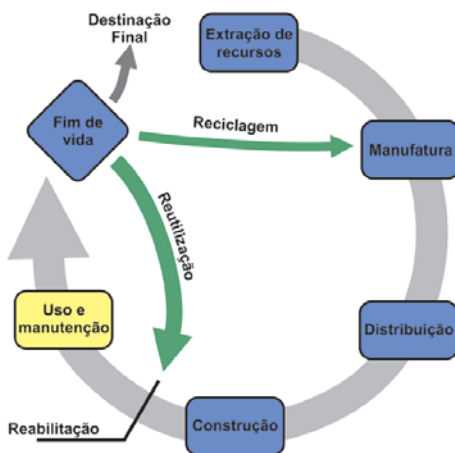
APRESENTAÇÃO

A 2ª Conferência das Nações Unidas sobre Assentamentos Humanos (HABITAT II) estabeleceu que a preservação do patrimônio edificado é fundamental para o uso sustentável de recursos naturais e antrópicos. Definiu ainda que os projetos de preservação do patrimônio devam assegurar o atendimento dos requisitos atuais de desempenho ambiental (UN-HABITAT, 1996). Entretanto, o desenvolvimento de políticas públicas para a preservação do patrimônio edificado não pode abrir mão da definição de indicadores de desempenho social, econômico e ambiental. O objetivo do trabalho que ora se apresenta é abordar este último quesito: o valor ambiental da preservação do patrimônio edificado.

O presente questionário é parte de uma pesquisa que propõe a elaboração de um instrumento para avaliar a viabilidade ambiental da reabilitação de edificações existentes, sobretudo aquelas de valor cultural e interesse para a preservação. Para tanto, propõe-se um procedimento para quantificar o impacto ambiental que é evitado pela da reabilitação de edifícios existentes em contraponto à sua demolição e construção de novas edificações.

O procedimento proposto baseia-se no conceito de ciclo de vida. Este é um enfoque no qual um sistema ambiental, seja ele a fabricação de um produto ou a execução de um serviço, tem seu ciclo de vida desdobrado em etapas, como: extração de matérias primas, manufatura, transporte, utilização e descarte, por exemplo. Em uma análise de ciclo de vida, é possível quantificar, avaliar e identificar as oportunidades de aperfeiçoamento do desempenho ambiental do produto ou serviço em cada uma dessas etapas.

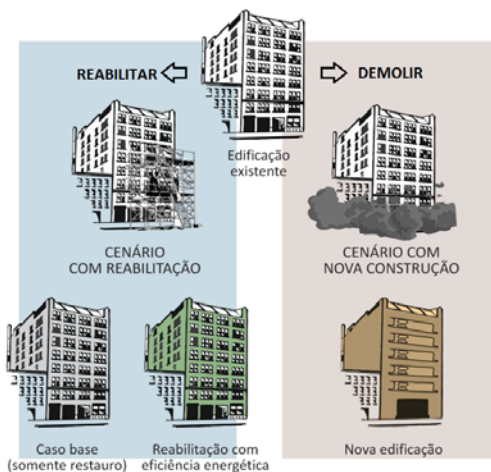
Na análise de ciclo de vida de uma edificação, podem ser quantificadas as cargas ambientais desde a extração de matérias primas para a fabricação de materiais; transporte do e para o canteiro de obras; construção; passando ainda pela operação e manutenção do edifício e eventuais reformas; até a demolição e destinação final dos resíduos de construção (ver figura a seguir). Em cada uma das etapas envolvidas são inventariadas as cargas ambientais envolvidas – desde o uso de recursos, como o consumo de água, energia e matérias primas, por exemplo – até as respectivas consequências ao meio ambiente, como uso e contaminação do solo, emissões atmosféricas e despejo de fluidos tóxicos.



Ciclo de vida de uma edificação, quando considerada a possibilidade de sua reabilitação.

A reabilitação possibilita um novo estágio de uso e operação a uma edificação existente, reutilizando grande parte de componentes e estruturas já construídas, com pouco acréscimo e/ou descarte de materiais e energia. É também uma oportunidade ímpar de alçar essas edificações a níveis superiores de desempenho ambiental, reduzindo, sobretudo, o consumo de energia para sua operação.

No procedimento proposto nessa pesquisa, a técnica da análise de ciclo de vida é empregada para comparar dois cenários diferentes, ilustrados na figura a seguir. Um cenário considera a reabilitação de uma edificação existente, analisando a possibilidade de apenas restaurá-la ou, ainda, de realizar intervenções que reduzam seu consumo de energia na etapa de uso do seu ciclo de vida. O outro cenário considera a hipótese de demolição da mesma edificação, seguida da construção de uma nova edificação equivalente em seu lugar. A partir da comparação dos resultados das análises de ciclo de vida de cada um desses cenários, é possível estimar se a reabilitação da edificação é ambientalmente viável, bem como quanto de impacto ambiental pode ser evitado em relação à sua demolição e construção de uma nova edificação.



Cenários avaliados no procedimento proposto.

A elaboração do escopo de uma análise de ciclo de vida envolve a tomada de decisões de caráter subjetivo e a consideração de uma série de pressupostos e premissas. O propósito deste questionário é consultar diferentes especialistas quanto à pertinência dos pressupostos e premissas adotados no procedimento proposto para avaliar a viabilidade ambiental da reabilitação de edificações.

Suas respostas às 18 questões que seguem serão de grande valia para o aperfeiçoamento do procedimento. As respostas são opinativas, baseados em sua experiência profissional e formação. Este questionário será respondido por outros especialistas do meio acadêmico e profissional, das diversas áreas abrangidas pela pesquisa. Caso você não se sinta confortável em responder alguma(s) das questões – por não dizer respeito à sua área –, por favor, faça referência no espaço reservado aos comentários.

Muito obrigado!

Dados de identificação

Nome:

Endereço eletrônico:

Formação:

Principais qualificações e áreas de experiência:

Questão 1:

Foram analisadas na literatura científica duas abordagens principais na definição de indicadores quantitativos para se avaliar a viabilidade ambiental da reabilitação de edificações existentes, descritas a seguir. Indique a abordagem que, em sua opinião, é a mais adequada:

- ☐ Uma abordagem considera que a reabilitação conservaria os recursos e a energia já investidos na construção da edificação existente. Demolir uma edificação, por sua, significaria desperdiçar todos esses recursos e energia, uma vez que não há como reaproveitá-los ou convertê-los para outras aplicações, exceto pela possibilidade de reciclagem de alguns materiais. Neste caso, o principal indicador para justificar a viabilidade ambiental da reabilitação é a quantidade de recursos e energia que o edifício existente traz incorporados em seu ciclo de vida.
- ☐ A outra abordagem é a do impacto ambiental evitado, que trata os impactos ambientais ocorridos no passado como custos irrecuperáveis. Isto é, as consequências ambientais relacionadas ao consumo de recursos e energia, empregados na construção e na utilização de uma edificação existente ocorreram no passado; não são mais responsáveis por impactos ambientais hoje ou no futuro. Por outro lado, os recursos que serão utilizados agora ou nas próximas décadas são aqueles que devem ser poupados e que, de fato, repercutem no meio ambiente. Assim, a reabilitação de um edifício existente conservaria somente os recursos que deixariam de ser utilizados para construir uma nova edificação em seu lugar caso ela fosse demolida. Neste caso, o indicador é a diferença entre os recursos e energia necessários para reabilitar uma edificação ou demoli-la e construir outra em seu lugar.

Comentários:

Questão 2:

No procedimento proposto neste trabalho foi empregado o princípio do impacto ambiental evitado (a segunda abordagem da Questão 1). Assim, a viabilidade ambiental da reabilitação arquitetônica é avaliada a partir da comparação com uma medida de referência, no caso, a construção de uma edificação nova no lugar da edificação existente. A partir do princípio do impacto ambiental evitado, as consequências ambientais relacionadas à edificação existente, desde sua construção até o momento em que se decide por sua reabilitação ou demolição, não são consideradas na comparação. São definidos dois cenários para comparação, nos quais são contabilizadas apenas as consequências ambientais que, potencialmente, possam vir a ocorrer:

- No **cenário com reabilitação** são contabilizadas as consequências ambientais relacionados às obras de reabilitação da edificação existente, tais como: disposição do entulho de materiais substituídos; extração de matéria-prima e fabricação de novos materiais empregados nas obras de reabilitação; transporte de materiais e entulho. Também são contabilizadas as consequências ambientais referentes à utilização da edificação ao longo de um novo ciclo de vida útil pós-reabilitação
- No **cenário com nova construção**, são computadas as consequências ambientais referentes à demolição da edificação existente e construção de uma nova edificação equivalente: disposição do entulho da demolição completa da edificação existente; extração de matéria-prima e fabricação de novos materiais empregados na construção da nova edificação; transporte de materiais e entulho. Neste cenário são consideradas, ainda, as consequências ambientais referentes à utilização da nova edificação ao longo de seu primeiro ciclo de vida útil.

Em sua opinião, o procedimento é adequado quanto à aplicação do conceito do impacto ambiental evitado?

☐

Sim

☐

Não

☐

Parcialmente

Comentários:

Questão 3:

Uma análise de ciclo de vida comparativa exige que, dentro dos quesitos avaliados, os objetos dos cenários comparados tenham função e desempenho equivalentes. Considerou-se na pesquisa que a função de uma edificação é oferecer uma determinada área útil, para ser ocupada por um dado número de usuários realizando tarefas definidas e em condições específicas de conforto. A edificação deve ainda desempenhar sua função ao longo de um determinado período de tempo, a sua vida útil.

Considerando que, nas obras de reabilitação, sejam realizadas as intervenções suficientes e necessárias para que a edificação existente possa desempenhar suas funções ao longo de um novo estágio de uso no seu ciclo de vida, pressupõe-se que tanto a edificação reabilitada quanto a nova construção possam preservar suas capacidades funcionais e desempenho durante períodos de vida útil iguais.

Em sua opinião, esta premissa é verdadeira?

☐ Sim

☐ Não

☐ Parcialmente

Comentários:

Questão 4:

Na ausência de normas e estudos específicos sobre a durabilidade de edificações no Brasil, o período definido para o estágio de uso no ciclo de vida no procedimento proposto é determinado de acordo com a vida útil de projeto de edificações, definido na norma NBR 15575-1 (ABNT, 2013). Embora a norma tenha sido desenvolvida para edificações residenciais, em seu Anexo C, que trata de considerações sobre durabilidade e vida útil, são abordados todos os tipos de edificação. A vida útil dos componentes construtivos manuteníveis e substituíveis das edificações também é determinada com base na mesma norma.

Em sua opinião, a adoção da norma NBR 15575-1 (ABNT, 2013) é suficiente?

☐

Sim

☐

Não

☐

Parcialmente

Comentários:

Questão 5:

No procedimento proposto, adota-se uma abordagem recorrente para o ciclo de vida das edificações, no qual o estágio de uso pode ser renovado continuamente com reabilitações consecutivas. Assim, o estágio de uso do ciclo de vida é tratado como o intervalo de tempo esperado para que a edificação do cenário com reabilitação passe por nova reabilitação, ou a edificação do cenário com nova construção receba sua primeira reabilitação, e assim sucessivamente.

Desta forma, são excluídos da comparação, em ambos os cenários, as consequências ambientais da demolição final das edificações. A demolição de edificação existente é considerada apenas hipoteticamente na definição do marco de referência: o cenário com nova construção.

Em sua opinião, a vida útil de uma edificação pode ser renovada continuamente por meio de reabilitações sucessivas?

☐ Sim

☐ Não

☐ Parcialmente

Comentários:



Questão 6:

No procedimento proposto, todos os materiais resultantes das demolições e substituições de componentes são analisados como se fossem encaminhados para disposição final em aterro de materiais inertes.

Não existem estatísticas confiáveis quanto ao percentual de resíduos de construção e demolição que recebe destinação regular e quanto é reciclado. Assim, considera-se que o aproveitamento dos materiais potencialmente recicláveis deve ser contabilizado no ciclo de vida do novo produto onde esses materiais forem empregados, quando e se isto vier a ocorrer.

Os impactos ambientais adicionais gerados pela destinação inadequada dos resíduos prejudicariam o cenário com nova construção na comparação, contrariando o princípio do impacto ambiental evitado. O cenário com nova construção gera uma quantidade maior de entulho, por conta da demolição da edificação existente.

Em sua opinião, essas premissas são verdadeiras?

☐

Sim

☐

Não

☐

Parcialmente

Comentários:

Questão 7:

Uma análise de ciclo de vida pode ser realizada em diferentes níveis de profundidade e abrangência – chamados de fronteiras do sistema –, de acordo com os objetivos do estudo e disponibilidade de dados.

De forma geral, na análise de ciclo de vida de edificações, as fronteiras do sistema podem abranger desde a edificação em si e seu uso e ocupação, ou incluir também alterações marginais na estrutura urbana provocadas pela edificação, por exemplo, a necessidade de novas áreas de estacionamento e outras infraestruturas.

No procedimento proposto, são consideradas somente as edificações em si e seu uso e ocupação. As consequências marginais não são incluídas nas fronteiras do sistema. Uma vez que nos dois cenários comparados as edificações desempenham a mesma função (ver definição na Questão 3), considera-se que essas atividades não sofreriam a interferência de diferentes alternativas de projeto, seja a construção de uma nova edificação ou a reabilitação de uma existente.

Você considera esta premissa verdadeira?

☐ Sim

☐ Não

☐ Parcialmente

Comentários:

Questão 8:

No procedimento proposto, o **cenário com reabilitação** contempla dois casos:

- Um “caso base”, no qual são consideradas apenas as intervenções necessárias para se promover uma fase de uso para a edificação existente;
- O “caso reabilitação com eficiência energética”, em que são avaliadas intervenções na edificação existente com vistas a melhorar seu desempenho termoenergético e reduzir o consumo de energia na fase de uso de seu ciclo de vida.

No “caso reabilitação com eficiência energética”, são consideradas medidas de conservação de energia realizadas através de melhorias no envoltório da edificação, tais como: redimensionamento ou instalação de brises e proteções solares; aplicação de isolamento térmico na cobertura; substituição de vidros ou de esquadrias externas; alteração de cores ou revestimentos das fachadas. As intervenções são balizadas pelos princípios da preservação do patrimônio edificado tomados a partir da abordagem crítico-conservativa, quais sejam: distinguibilidade; reversibilidade; mínima intervenção; compatibilidade de técnicas e materiais.

Você considera que a redução no consumo de energia e respectivas consequências ambientais pode justificar a realização de intervenções no envoltório de edificações de valor cultural e interesse para preservação?

☐

Sim

☐

Não

☐

Parcialmente

Comentários:

Questão 9:

No **cenário com reabilitação** do procedimento proposto, parte-se do pressuposto que o edifício existente possa ser readequado aos padrões de desempenho, conforto e segurança atuais.

Assim, considera-se que as instalações prediais e os equipamentos funcionais antigos possam ser substituídos quando da reabilitação. Considera-se, também, que as instalações e equipamentos novos operam com a mesma eficiência tanto em edificações antigas quanto em novas construções.

Em sua opinião, estas premissas são verdadeiras?

☐

Sim

☐

Não

☐

Parcialmente

Comentários:

Questão 10:

O **cenário com nova construção** representa o marco de referência para se avaliar a viabilidade da reabilitação da edificação existente.

Foram identificadas na literatura especializada diferentes alternativas para a definição de uma edificação de referência, elencadas a seguir. Classifique de 1 a 4 quais alternativas você considera mais adequadas para a comparação com o desempenho de edificação existente (sendo 1 a mais adequada e 4 a menos adequada):

- A elaboração do projeto de uma edificação nova, de acordo com padrões construtivos atuais, para o mesmo terreno da edificação existente.
- A seleção de outra edificação existente, construída há não muito tempo em outro terreno, e considerada representativa do parque edilício de mesma categoria de uso da edificação antiga. Eventuais diferenças nas áreas d a edificação existente e da edificação de referência são normalizadas, dividindo-se os resultados da análise de ciclo de vida por 1 metro quadrado de área construída;
- A reconstrução do próprio edifício existente, mas adequando-o aos padrões e técnicas construtivas atuais.
- A utilização de um arquétipo, uma edificação teórica elaborada de acordo com dados estatísticos do parque edilício de edificações de mesma categoria de uso da edificação antiga.

Comentários:

Questão 11:

Pretende-se que o procedimento proposto seja empregado como uma ferramenta expedita de apoio à decisão entre reabilitar ou não uma edificação. Assim, em relação à questão anterior, para evitar-se dispêndio de tempo e recursos na elaboração dos projetos de arquitetura e engenharia de uma edificação nova, descartou-se esta alternativa como referência no **cenário com nova construção**. A hipótese da seleção de outra edificação existente também foi desconsiderada, uma vez que esta alternativa apresentaria limitações para se garantir a equivalência de função e desempenho exigida em análises de ciclo de vida comparativas. A equivalência de função e desempenho poderia ser prejudicada, por exemplo, pelo fato de que construções de mesma área útil, porém de projeções distintas, resultarem em edificações com índices de compacidade diferente.

Propõe-se, então, um modelo teórico de edificação que combina as duas últimas alternativas. É definido um arquétipo para representar a nova construção, com área construída, projeção e número de pavimentos idênticos ao da edificação existente. O arquétipo é complementado com parâmetros construtivos que representam a média da prática construtiva atual para edificações da mesma categoria, levantados por métodos estatísticos. O arquétipo passa ainda por ligeiras modificações para se adequar ao nível de eficiência energética mais elevado no sistema brasileiro de etiquetagem de edificações (MME, 2011). Desta forma, têm-se uma referência para avaliar o consumo de energia para operação da edificação existente à luz do desempenho almejado em instrumento regulatório para construções novas.

Você considera o modelo proposto para a nova construção adequado para a comparação com a edificação existente?

☐

Sim

☐

Não

☐

Parcialmente

Comentários:

Questão 12:

Em relação à questão anterior, a proposição do arquétipo da nova construção – com área construída, projeção e número de pavimentos idênticos aos da edificação existente – poderia levantar questionamentos quanto à possibilidade de as leis urbanísticas atualmente vigentes para o terreno permitirem a edificação de uma área construída maior.

Contudo, no procedimento proposto, foi considerado que esta área construída excedente dependeria de demandas sociais, econômicas ou mesmo especulativas reais e, portanto, seria edificada em outro lugar de qualquer maneira. Ou seja, as consequências ambientais decorrentes da construção da estrutura necessária para suprir essa área útil não seriam impedidas pela preservação da edificação existente. Portanto, não seria um impacto ambiental evitado pela reabilitação, de acordo com o princípio adotado no procedimento proposto.

Você considera essa premissa verdadeira?

☐

Sim

☐

Não

☐

Parcialmente

Comentários:

Questão 13:

No procedimento proposto, deve ser estimado o consumo de energia para a operação das edificações ao longo da etapa de uso de seu ciclo de vida. O uso de energia nos edifícios se dá, sobretudo, pela utilização de equipamentos elétricos e mecânicos, pelos sistemas de iluminação artificial, de aquecimento de água e de climatização (calefação ou resfriamento do ar interno). O consumo para climatização é influenciado pelos ganhos ou perdas de calor pelo envoltório da edificação e pela carga interna provocada pelos usuários e pelo uso de equipamentos e de iluminação artificial.

Foram identificados na literatura alguns métodos empregados para estimar o consumo de energia para operação de edificações em análises de ciclo de vida comparativas, elencados a seguir. Indique “A” para o método que você considera mais adequado, considerando as diferenças entre as particularidades construtivas de uma edificação antiga e uma construção nova; indique “S” para a(s) alternativa(s) que você considera suficiente(s), considerando que o procedimento proposto pretende-se expedito; “I”, se você considerar alguma(s) das alternativa(s) inadequada(s).

- ☐ A utilização de dados médios regionais ou nacionais de consumo de energia pelas edificações, de acordo com a tipologia e a época de construção;
- ☐ A utilização de programas computacionais de simulação termoeenergética de edificações, que consideram informações como dados climáticos anuais, características construtivas, equipamentos instalados e regime de utilização da edificação para estimar seu consumo de energia;
- ☐ A utilização de métodos prescritivos, que também consideram os itens citados na questão anterior, mas estimam o consumo de energia por meio de cálculos mais simplificados que empregam equações obtidas a partir de análises de regressão de dados estatísticos do parque edilício.

Comentários:

Questão 14:

O cerne de uma análise de ciclo de vida é o levantamento das cargas ambientais envolvidas na execução de um serviço ou na fabricação de um produto – o inventário de ciclo de vida. No inventário do ciclo de vida de uma edificação, podem ser quantificados a energia, água, materiais construtivos e demais substâncias utilizadas ou geradas no canteiro de obra; na operação, manutenção e demais obras ao longo da sua vida útil; e, por fim, na sua demolição.

Foram identificadas na literatura duas abordagens principais para a quantificação dos materiais e composições envolvidos nas obras de edificações.

- A estimativa realizada com base em planilhas de quantitativos completas, realizada e/ou conferida por pessoal especializado;
- A estimativa baseada em índices médios por unidade de construção (metro ou metro quadrado, por exemplo), de acordo com o sistema construtivo.

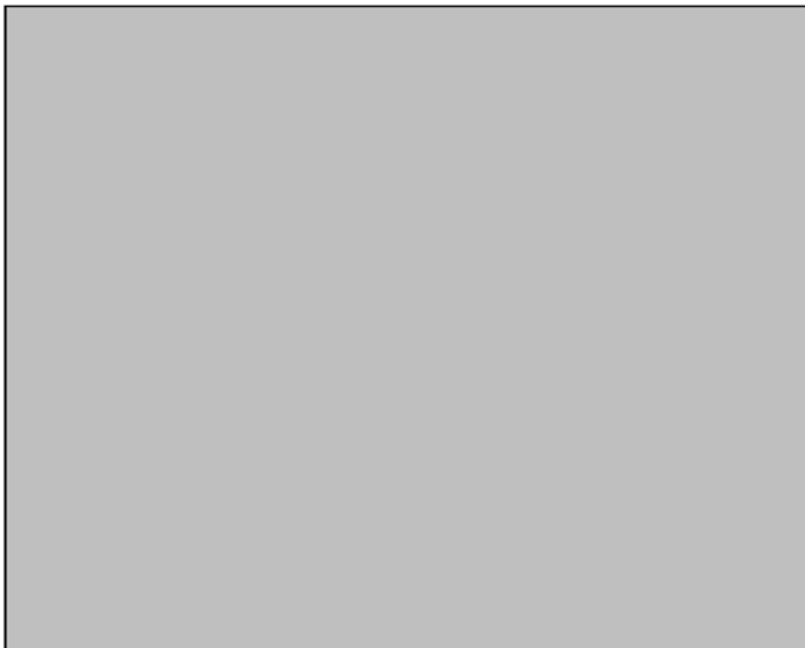
Considerando que o procedimento proposto seja empregado como uma ferramenta expedita de apoio à decisão entre reabilitar ou não uma edificação, você considera a segunda abordagem suficiente para estimar com uma margem de segurança aceitável os quantitativos de materiais de uma obra?

☐ Sim

☐ Não

☐ Parcialmente

Comentários:



Questão 15:

Para quantificar de maneira expedita os quantitativos de materiais na análise de ciclo de vida dos modelos, foi definido para o procedimento proposto a utilização de tabelas padronizadas de composições de materiais e serviços para a construção civil, como as Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos (TCPO).

No caso da edificação existente, são calculados os quantitativos a partir do levantamento arquitetônico e estimadas as composições utilizando-se TCPO da época de sua construção. O objetivo do procedimento é abranger edificações de interesse para preservação do passado recente, portanto, a primeira TCPO editada já cobre o período. No caso do arquétipo da nova construção, os quantitativos e composições de materiais foram estimados com base dos índices médios indicados na TCPO mais recente.

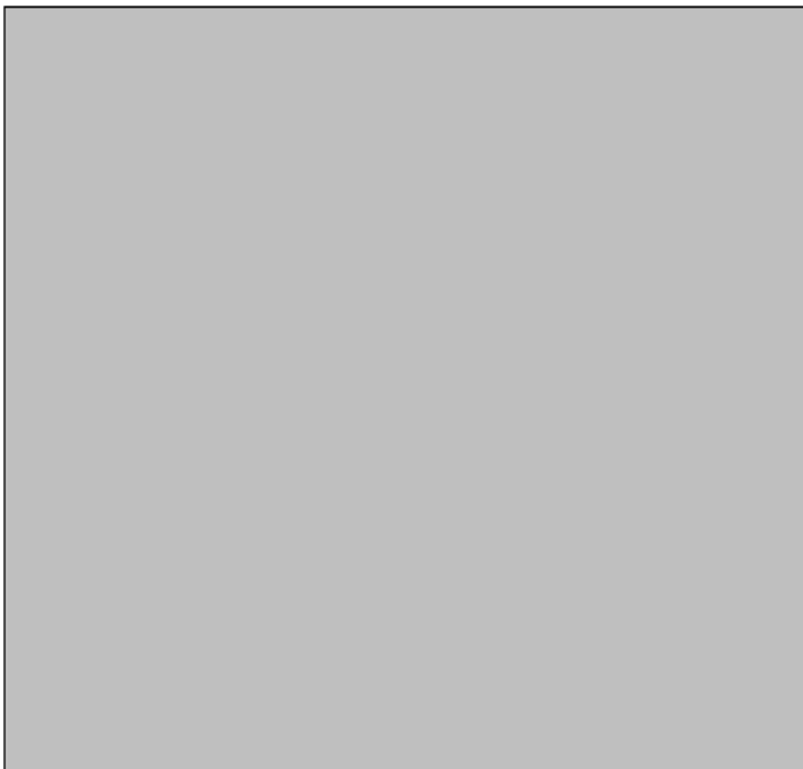
Você considera este procedimento apropriado?

☐ Sim

☐ Não

☐ Parcialmente

Comentários:



Questão 16:

No inventário de ciclo de vida, todos os materiais quantificados são correlacionados com os respectivos insumos, substâncias e energia, retirados ou liberados no meio ambiente ao longo do ciclo de vida do produto analisado. De forma geral, a obtenção desses dados envolve levantamentos sistemáticos nos processos de produção junto aos fabricantes, com medições diretas das quantidades de insumos e energia que entram e saem do processo. Outra forma de levantamento de dados para o inventário de ciclo de vida é a partir de matrizes insumo x produto (*input-output*), tendo por base dados gerais (regionais ou nacionais, por exemplo) dos setores produtivos envolvidos.

Diante da complexidade e quantidade de materiais abrangidos na análise de ciclo de vida de edificações, já existem disponíveis para o mercado e para a comunidade científica bases de dados com inventários de diversos materiais e componentes construtivos. Tais bases de dados devem ser utilizadas com cautela, dado as diferenças regionais entre os processos de produção e os sistemas construtivos.

No procedimento proposto, utilizam-se bases de dados internacionais para o inventário de ciclo de vida, dada a inexistência, até o momento, de uma base de dados brasileira. Contudo, os dados das bases utilizadas são confrontados com aqueles já levantados na literatura científica nacional e modificados de acordo com a realidade tecnológica e a matriz energética brasileira.

Você considera este procedimento apropriado?

☐

Sim

☐

Não

☐

Parcialmente

Comentários:

Questão 17:

Através da análise de impacto ciclo de vida, as cargas ambientais de cada uma das etapas do ciclo de vida de um produto ou serviço podem ser categorizadas em termos de impactos ao meio ambiente, como o potencial de aquecimento global, depleção de recursos, acidificação, eutrofização etc. Os resultados de uma análise de ciclo de vida podem ainda ser agregados em um sistema de pontuação ou em indicadores como a “Pegada Ecológica” (*Ecological Footprint*), por exemplo.

Na primeira coluna à esquerda, indique “F” para a(s) categoria(s) de impacto que você conhece ou está familiarizado e “I” para a(s) categoria(s) de impacto com as quais você não está familiarizado ou ignora.

Na última coluna à direita, classifique de 1 a 4 quais grupos de categorias de impacto (divididos por cores) você considera mais adequados para a comparação do desempenho ambiental de edificações (sendo 1 o mais adequado e 4 o menos adequado).

	Categoria de Impacto	Unidade da categoria de impacto	
-	Energia Acumulada	MJ	-
-	Mudanças climáticas	kg CO ₂ para a atmosfera	
-	Depleção da camada de ozônio	kg CFC-11 para a atmosfera	
-	Acidificação do solo	kg SO ₂ para a atmosfera	
-	Eutrofização de águas potáveis	kg P para a água doce	
-	Eutrofização de águas marinhas	kg N para a água doce	
-	Toxicidade humana	kg 1,4 diclorobenzeno na atmosfera urbana	
-	Formação de foto-oxidantes	kg COV não metânicos para o ar	
-	Formação de particulados	kg PM ₁₀ para a atmosfera	
-	Ecotoxicidade dos solos	kg 1,4 diclorobenzeno para o solo industrial	
-	Ecotoxicidade das águas potáveis	kg 1,4 diclorobenzeno para a água doce	
-	Ecotoxicidade das águas marinhas	kg 1,4 diclorobenzeno para os oceanos	
-	Radiações ionizantes	kg U ²³⁵ para a atmosfera	
-	Ocupação do solo arável	m ² x ano (solo arável)	
-	Ocupação do solo urbano	m ² x ano (solo urbano)	
-	Transformação do ambiente natural	m ² (solo natural)	
-	Esgotamento de mananciais	m ³ (água)	
-	Depleção de recursos minerais	kg Fe	
-	Depleção de recursos fósseis	kg petróleo	
-	Danos à saúde humana	Ano (DALY)	
-	Danos à diversidade dos ecossistemas	Perda de espécies ao longo de um ano	
-	Danos à disponibilidade de recursos	Custo excedente para extração	
-	Pegada Ecológica	Hectares globais	-

Questão 18:

A respeito das categorias de impacto apresentadas na questão anterior, você considera que elas são **SIM** de razoável compreensão pelos profissionais de arquitetura, engenharia e construção e passíveis de serem incorporadas em políticas públicas para o setor da construção civil; ou **NÃO** são adequadas e deveriam ser representadas sob a forma de pontuações únicas ou certificados, a exemplo dos sistemas de certificação ambiental como o LEED, por exemplo.

☐

Sim

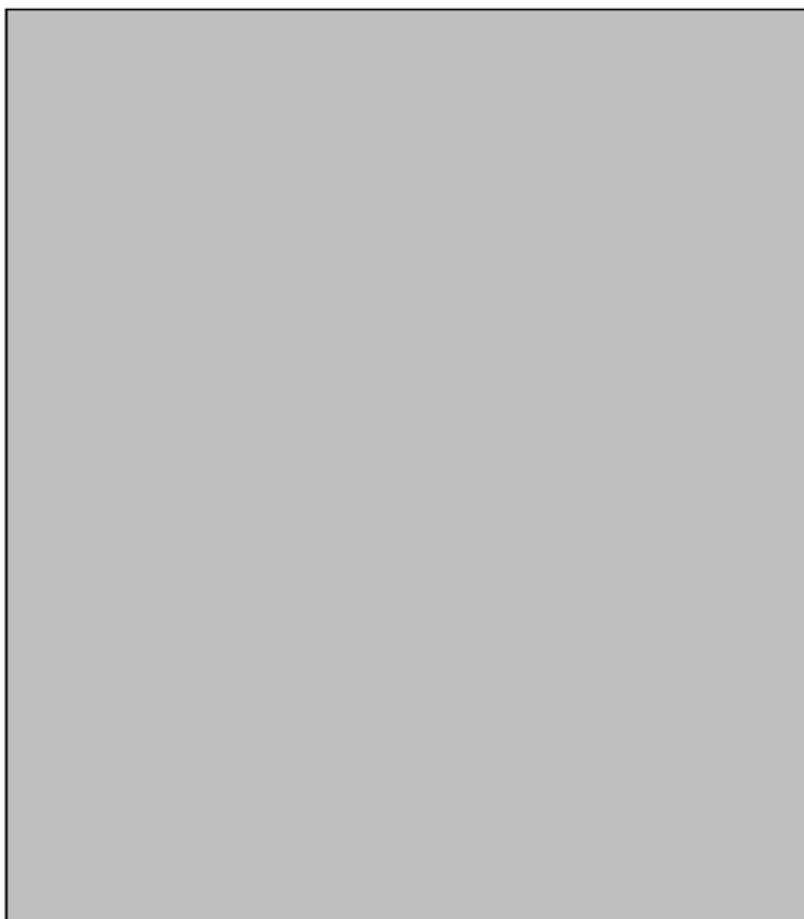
☐

Não

☐

Parcialmente

Comentários:



Muito obrigado por sua participação!

Suas respostas serão de grande valia para o aperfeiçoamento e validação do método que visa avaliar a viabilidade ambiental da reabilitação de edificações.

Por favor, clique no botão abaixo para salvar suas respostas, e não esqueça de em seguida enviar o arquivo salvo para ulisses.munarim@outlook.com.

Salvar formulário

Att.,

Ulisses Munarim.

APÊNDICE B – QUALIFICAÇÃO DOS MEMBROS DO PAINEL DE ESPECIALISTAS

(Elaborado a partir dos textos fornecidos nos questionários ou do currículo Lattes dos profissionais).

ESPECIALISTA PARA A ÁREA DE CONSERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO EDIFICADO

Arq. Isabel Kanan

Formação: Graduação em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1976), mestrado em *Architectural Conservation Studies - Institute of Architectural Advanced Studies/University of York/ UK* (1992), doutorado em *Science of Conservation - Bournemouth University - ING* (1995) e foi *Guest Scholar* pelo *Getty Conservation Institute*, Los Angeles, EUA, de 2001 a 2002.

Experiência: Pesquisa e ensino no CECRE/UFBA, onde leciona desde 1996. Tem experiência na área de Arquitetura e Urbanismo, com ênfase na pesquisa das tecnologias de conservação/restauração, a capacitação de equipes de obras e profissionais, atuando principalmente nos seguintes temas: conservação e restauração arquitetônica, arquitetura tradicional, tecnologias de terra e cal. Membro ativo do *International Scientific Committee of Earthen Architectural Heritage*.

ESPECIALISTA PARA A ÁREA DE SIMULAÇÃO TERMOENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES

Eng. Edward Borgstein

Formação: Graduação em engenharia. Mestrado em engenharia: energia e meio ambiente.

Experiência: *CEng MCIBSE, MASHRAE, BREEAM AP, Certified Passivhaus Designer*. Atua com *retrofit* de edificações; energias renováveis; retrocomissionamento e auditoria energética; simulação computacional; políticas públicas.

ESPECIALISTA PARA A ÁREA DE ESTIMAÇÃO/ORÇAMENTAÇÃO DE OBRAS

Eng. Mário Alves do Rosário Pires

Formação: Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Londrina em 2002.

Experiência: Atuação em Projetos Estruturais e de Instalações; Planejamento, Controle e Execução de Obras de 2002 a 2004; atuação em Orçamento, Planejamento e Controle de Obras até 2006; atuação em Análise de Projetos, Planejamento, Orçamento e Fiscalização de Obras em edificações e áreas de interesse cultural no Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional desde 2006.

ESPECIALISTA REPRESENTANDO O RAMO DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Eng. Olavo Kucker Arantes

Formação: Engenheiro de Produção Civil formado em 1986 pela Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Brasil. Especialização na escola de novos empreendedores (ENE/UFSC), com mestrado na engenharia de produção na área de gestão de projetos e inteligência competitiva.

Experiência: Diretor de meio ambiente do SINDUSCON Florianópolis. Co-fundador do Conselho Consultivo do Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS). Consultor na área de sustentabilidade e inovação do projeto "Cidade Pedra Branca" junto ao programa Clima Positivo da Fundação Clinton. Membro do Conselho Estadual das Cidades (2011-2014). Membro do Conselho Municipal de Saneamento (2010-2011 / 2012-2014). Participação do Conselho Estratégico do Programa Construção Sustentável da CBIC (Câmara Brasileira da Indústria da Construção). Atuação na área de incorporação e construção de edificações, primeiramente na área de planejamento e custos de obras e depois nas áreas de desenvolvimento e planejamento e gerenciamento de projetos de incorporação.

ESPECIALISTA PARA A ÁREA DE PROJETO ARQUITETÔNICO E SUSTENTABILIDADE

Arq. Ricardo Socas Wiese

Formação: Arquiteto e Urbanista pela UFSC (2004) e doutor em "Progettazione Ambientale " pela "Università di Roma - La Sapienza" (2010).

Experiência: Professor do curso de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) desde 2013. Entre 2004 e 2009, atuou como arquiteto em importantes escritórios de arquitetura da Itália, como o "Studio Insula" e o "LCA architettura". Tem experiência na área de Planejamento e Desenvolvimento de Projetos Arquitetônicos e Tecnologia da Arquitetura com ênfase nas questões de sustentabilidade aplicada à arquitetura.

ESPECIALISTA PARA A ÁREA DE ANÁLISE DE CICLO DE VIDA APLICADA A EDIFICAÇÕES

Eng. Andreza Kalbusch

Formação: Graduação em Engenharia Civil pela Universidade do Estado de Santa Catarina (2001), Mestrado em Engenharia Civil pela Universidade de São Paulo (2006) e Doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina (2011).

Experiência: Sistemas prediais hidráulicos e sanitários; sustentabilidade no ambiente construído; hidráulica; uso racional da água.

ESPECIALISTA PARA A ÁREA DE ANÁLISE DE CICLO DE VIDA

B. Tiago Barreto Rocha

Formação: Graduação em Ciência da Computação (UESC), Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais (UTFPR); doutorando pela FEM/UNICAMP

Experiência: Sócio da ACV Brasil, desenvolve atividades de pesquisa em Avaliação do Ciclo do Vida com ênfase em biocombustíveis e eletroeletrônicos. Pesquisador do programa AMBIENTRONIC do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação.

ESPECIALISTA PARA A ÁREA DE PLANEJAMENTO URBANO

Arq. Roberto Marquetti dos Santos

Formação: Graduação em arquitetura e urbanismo/UFSC; Mestrado em planejamento urbano/UFSC.

Experiência: Atuação na área pública do município de Itajaí junto ao planejamento urbano, elaboração de legislação urbana, fiscalização de obras, direção de controle urbano e coordenação de auditores fiscais. Membro representante da Secretaria de Urbanismo nos conselhos municipais de transporte coletivo, habitação e urbanismo.

ESPECIALISTA PARA A ÁREA DE PROJETO ARQUITETÔNICO

Arq. Vanessa Maria Pereira

Formação: Graduação em arquitetura e urbanismo. Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e História da Cidade.

Experiência: Experiência em projeto e fiscalização de obras de restauração e novas edificações (desde 2004 até os dias atuais); Professora da UFSC e Faculdades Barddal na área de "Preservação do Patrimônio Cultural e Restauração" e "Planejamento Urbano"; Superintendente do Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis (desde janeiro de 2014); Superintendente Adjunta do Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis (fev 2013 - jan de 2014).

APÊNDICE C – DISTÂNCIAS FÁBRICA-CANTEIRO CONSIDERADAS NO EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO MÉTODO

Tabela C.1 - Distâncias fábrica-canteiro consideradas nas análises de ciclo de vida do exemplo de aplicação do método

Material / componente	Endereço do fabricante	Distância (km)	Distância média (km)
Concreto	Vereador Rogerio da Silva, 1329, Palhoça - SC	27	36
	Rod. SC 401, 4820, Florianópolis - SC	11	
	Nereu Ramos, 3284, Itapema - SC	70	
Aço	Av. Getúlio Vargas, 3200, Charqueadas – RS	506	602
	Dianópolis, 1278, São Paulo - SP	698	
Ferragens	Rua Almirante Tamandaré, 523, Porto Alegre – RS	456	382
	Diamante do Norte, 216, Curitiba - PR	307	
Madeiras	BR 101, Alto Arroio, Imbituba - SC	81	164
	SC 440 - Km 5, S/N, Pedras Grandes - SC	157	
	Rua do Príncipe, Itapoá - SC	253	
Bloco cerâmico	Rua Senador Gallotti, 400, Tijucas - SC	60	152
	Silvio Agustini 280, Pouso Redondo - SC	224	
	SC 427 KM 11, Ituporanga - SC	172	
Argamassa industrializada	Leonardo P. Schmitt, 3500, Gaspar - SC	83	118
	Professor Max Humpl, 1446, Blumenau - SC	152	
Telha fibrocimento	Rua Ronat Walter Sodré, 4100, Ibiporã – PR	694	434
	Rua Presidente Faria, 5323, Colombo - PR	316	
	Av. Rui Barbosa, 2.929, São José dos Pinhais – PR	292	
Poliestireno expandido	Albano Schmidt, 2750, Boa Vista, Joinville - SC	179	450
	Alvaro Guimarães, 207, São Bernardo do Campo - SP	721	

Continua na página seguinte.

Tabela C.1 - Distâncias fábrica-canteiro consideradas nas análises de ciclo de vida do exemplo de aplicação do método

Material / componente	Endereço do fabricante	Distância (km)	Distância média (km)
Tintas	Benvindo Tolentino Neto, 247, Guarulhos - SP	719	701
	Ibirama, 480, Taboão da Serra - SP	669	
	Av. Angelo Demarchi, 123, São Bernardo do Campo, SP	715	
Granilite	Elvira Hamann, 01, Quatro Barras - PR	315	315
Pedra britada	Estrada Rio Branco / Cerro Azul, KM 2, Rio Branco do Sul - PR	334	403
	Fazenda Santana, Roseira - SP	859	
	Rod. Antonio Luiz Moura Gonzaga, 2146, Florianopolis - SC	16	
Areia	Estrada Rio Branco / Cerro Azul, KM 2, Rio Branco do Sul - PR	334	456
	Fazenda Santana, Roseira - SP	859	
	Rod Tranquilo Sartor - Linha Frasson, Morro da Fumaça - SC	175	
Cimento	Av. Ermirio de Moraes, 380, Rio Branco do Sul - PR	333	340
	BR 277 km 127, Balsa Nova - PR	347	
Argamassa colante	Rua Bela Vista, 81, Tubarão - SC	160	348
	Rua Dr Humberto Gianella, 996, Barueri - SP	697	
	Av. Edmundo Doubrawa, 1600, Joinville - SC	186	
Cerâmica	Rua Maximiliano Gaidzinski, 245, Cocal do Sul - SC	201	162
	Rodovia BR 101 Km 341, Tubarão - SC	144	
	Rua São João, 2050, Tubarão - SC	142	
Mármore e Pedra natural	Paraná 1000, Paraopeba - MG	1343	1,387
	Nova Venécia, ES	1779	
	Alferes José Justiniano dos reis, 335, Alpinópolis - MG	1038	

Continua na página seguinte.

Tabela C.1 - Distâncias fábrica-canteiro consideradas nas análises de ciclo de vida do exemplo de aplicação do método

Material / componente	Endereço do fabricante	Distância (km)	Distância média (km)
Esquadrias em alumínio	Beco São Pedro, 117, Indaial - SC	169	127
	Rua Presidente Castelo Branco, 140, Biguaçu - SC	17	
	Genésio Mazon - KM 05, Urussanga - SC	194	
Vidros	Rodovia BR-101 km 84, Barra Velha, SC	129	684
	Rodovia Gladys Minhoto Km 28,5, Tatuí - SP	663	
	Rua Desembargador Amorim, 88, Contagem - MG	1259	
Portas em madeira	Valfrido Soares Dos Santos, 180, Porto União - SC	423	340
	Alemanha, 120, Rio dos Cedros - SC	175	
	José E. da Cunha Silvera, 160, Porto União - SC	423	
Película de controle solar	Rua Lavradio, nº 415, São Paulo - SP	690	493
	Cezinando Dias Paredes, 1198, Boqueirão, Curitiba - PR	295	
Brise em alumínio	Beco São Pedro, 117, Indaial - SC	169	433
	Bertolina Maria, 39, São Paulo - SP	697	

APÊNDICE D – LEVANTAMENTO DE COMPOSIÇÕES E MATERIAIS PARA O INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA

D.i CASO BASE – RESTAURO DO EDIFÍCIO EXISTENTE

A Tabela D.1 elenca a estimativa os quantitativos totais de cada componente construtivo do edifício existente de acordo com a unidade empregada nas fontes que serviram de referência para as composições de materiais. A tabela apresenta ainda a relação vida de serviço da edificação / vida útil de cada componente, que determina o respectivo número de substituições dos componentes durante a vida de serviço da edificação.

Tabela D.1 – Quantitativos, relação vida de serviço da edificação / vida útil do componente e referências das composições para o restauro e manutenção do edifício existente

	Componente	Quantidade	VS / VU	Composições para demolições parciais	Referência para reparos e substituições
Estrutura	Baldrame	280,02 m ³	1	Estimado a partir de plantas de fôrmas remanescentes no arquivo do DEINFRA. Proporção de resíduos de 0.96kg de material inerte e 0.03kg de aço por m ³ de concreto armado, de acordo com TCPO 2, tabela n. 16 (I) (peso da ferragem 80 kg/m ³ de concreto armado).	TCPO13, composição 03932.8.1.1.
	Par. cortina	17,54 m ³			
	Pilares	693,89 m ³			
	Vigas	99,29 m ³			
	Lajes	1275,62 m ³			
	Escadas	30,86 m ³			
	Ático	3,17 m ³			
Alvenarias	Parede ext. (1 tijolo)	12824,64 m ²	1	TCPO 2, tabela n. 60. Bloco 11x25x22cm, junta 12mm.	TCPO 13, composição 04211.8.2.19. Bloco 9x9x19cm, junta 12mm.
	Parede int. (1/2 tijolo)	6236,13 m ²	2		

Continua na página seguinte.

Tabela D.1 – Quantitativos, relação vida de serviço da edificação / vida útil do componente e referências das composições para o restauro e manutenção do edifício existente

	Componente	Quantidade	VS / VU	Composições para demolições parciais	Referência para reparos e substituições
Cobertura	Estrutura madeira	658,36 m ²	2	TCPO 2, tabela n. 124. Para a telha, foi adotada a	TCPO 13, composição 06110.8.3.4.
	Telha fibrocimento	658,36 m ²	3	densidade indicada na NBR 15220.	TCPO 13, composição 07320.8.8.4.
Pisos	Granilite	217,47 m ²	3	Quantitativos baseados na TCPO 2, tabelas n. 188, 200, 183 e 196. Adotado	TCPO 13, composição 09627.8.3.1.
	Mármore	430,34 m ²		0,03 m ³ de argamassa de assentamento por m ² de piso. Assumida a densidade da	TCPO 13, composição 09635.8.6.1.
	Cerâmica	988,51 m ²		gravilha de concreto (DOKA, 2009) para os pisos de granilite e mármore. Densidade	TCPO 13, composição 09606.8.2._.
	Madeira	5692,00 m ²		do piso cerâmico baseado na NBR 15.220.	TCPO 13, composição 09640.8.3.1.
Revestimentos	Reboco ext.	12824,64 m ²	2	TCPO 2, tabelas n. 153, 157 e 158 (I)	TCPO 13, composições 09705.8.12.5,
	Reboco int.	32598.76 m ²	3		09705.8.2.2, 09705.8.3.25 e 09705.8.3.50
	Pintura ext.	12136,56 m ²	8	TCPO 13, composição 09115.8.11.13	TCPO 13, composição 09115.8.11.13
	Pintura int.	32598,75 m ²	15	TCPO 13, composição 09115.8.12.2	TCPO 13, composição 09115.8.12.2
	Mármore	263,00 m ²	3	TCPO 2, tabela n. 171	TCPO 13, composição 09285.8.3.1
	Pedra nat.	520,50 m ²	2	TCPO 2, tabela n. 172	TCPO 13, composição 09285.8.3.1
Aberturas	Aberturas externas	2204,85 m ²	2	Levantamento arquitetônico	Levantamento arquitetônico
	Portas em madeira	91,14 m ²	5	Levantamento arquitetônico	TCPO 13, composição 08210.8.7.15
	Pintura em madeira	237,42 m ²	15	TCPO 13, composição 09118.8.9.8	TCPO 13, composição 09118.8.9.8

Continua na página seguinte.

Tabela D.1 – Quantitativos, relação vida de serviço da edificação / vida útil do componente e referências das composições para o restauro e manutenção do edifício existente

	Componente	Quantidade	VS / VU	Composições para demolições parciais	Referência para reparo/substituição
Elementos de sombreamento	Brise NO	59,05 m ³			
	Brise NE	11,87 m ³		TCPO 2, tabela n. 16 (I), quantidades dos componentes para o cálculo do consumo de materiais - peso da ferragem necessária = 80 kg o volume de concreto armado.	TCPO13, composição 03932.8.1.1
	Frisos SO	4,34 m ³			
	Marquise NE	4,60 m ³	1		
	Marquise SE	5,69 m ³			
	Marquise SO	22,21 m ³			
	Platibandas	15,04 m ³			
	Pintura em concreto	1835,00 m ²	8	TCPO 13, composição 09115.8.11._	TCPO 13, composição 09115.8.11._

Na Tabela D.2 estão expressas as estimativas dos quantitativos de cada composição envolvida no restauro e em uma manutenção do edifício existente, de acordo com a unidade indicada no processo da base *ecoinvent 2.2*, considerados os percentuais de intervenção apresentados na Tabela 5.4. O número de manutenções ao longo da vida de serviço do edifício corresponde à relação VS/VU da Tabela D.1 menos uma manutenção (uma vez que o final de vida das edificações não é considerado nas fronteiras do sistema).

Tabela D.2 – Composições, quantitativos e processos envolvidos no restauro e manutenção do edifício existente

	Composição	Quantidade	Un.	Processo na base <i>ecoinvent</i> v. 2.2
Estrutura	Demolição concreto	1104181,25	kg	<i>disposal, building, concrete, not reinforced, to final disposal/kg/CH</i>
	Areia	488144,13	kg	<i>silica sand, at plant/kg/DE</i>
	Pedra britada	682672,06	kg	<i>gravel, crushed, at mine/kg/CH</i>
	Cimento Portland CP II-E-32	216035,46	kg	<i>cement, unspecified, at plant/kg/CH</i>
	Água de amassamento	97215,96	kg	<i>tap water, at user/CH U</i>
	Transporte de materiais	571162,62	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
Alvenaria externa	Demolição bloco cerâmico	250829,44	kg	<i>disposal, building, brick, to final disposal/kg/CH</i>
	Demolição argamassa	323180,93	kg	<i>disposal, building, cement (in concrete) and mortar, to final disposal/kg/CH</i>
	Bloco cerâmico 9x19x19	366271,72	kg	<i>brick, at plant/kg/RER</i>
	Argamassa de assentamento	156204,12	kg	<i>cement mortar, at plant/kg/CH</i>
	Água de amassamento	70291,85	kg	<i>tap water, at user/CH U</i>
	Transporte de materiais	74105,39	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
Alvenaria interna	Demolição bloco cerâmico	64795,89	kg	<i>disposal, building, brick, to final disposal/kg/CH</i>
	Demolição argamassa	39287,62	kg	<i>disposal, building, cement (in concrete) and mortar, to final disposal/kg/CH</i>
	Bloco cerâmico 9x19x19	89750,38	kg	<i>brick, at plant/kg/RER</i>
	Argamassa de assentamento	24445,63	kg	<i>cement mortar, at plant/kg/CH</i>
	Água de amassamento	11000,53	kg	<i>tap water, at user/CH U</i>
	Transporte de materiais	16526,64	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>

Continua na página seguinte.

Tabela D.2 – Composições, quantitativos e processos envolvidos no restauro e manutenção do edifício existente

	Composição	Quantidade	Un.	Processo na base ecoinvent v. 2.2
Cobertura	Demolição madeira	2085,69	kg	<i>disposal, building, waste wood, untreated, to final disposal/kg/CH</i>
	Demolição ferragens	17,12	kg	<i>disposal, building, bulk iron (excluding reinforcement), to sorting plant/kg/CH</i>
	Demolição fibrocimento	11376,48	kg	<i>disposal, building, cement-fibre slab, to final disposal/kg/CH</i>
	Estrutura madeira	1,34	m ³	<i>sawn timber, paraná pine (SFM), kiln dried, u=15%, at sawmill/m³/BR</i>
	Produção aço	15,80	kg	<i>steel, low-alloyed, at plant/kg/RER</i>
	Processamento aço	15,80	kg	<i>steel product manufacturing, average metal working/kg/RER</i>
	Transporte de materiais	164,62	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
	Telha fibrocimento	11755,69	kg	<i>fibre cement corrugated slab, at plant/kg/CH</i>
	Transporte de materiais	5101,97	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
	Demolição contrapiso	138505,12	kg	<i>disposal, building, cement (in concrete) and mortar, to final disposal/kg/CH</i>
Pisos	Demolição piso granilite	1043,84	kg	<i>disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill/kg/CH</i>
	Demolição mármore	3786,98	kg	<i>disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill/kg/CH</i>
	Demolição piso cerâmico	3163,22	kg	<i>disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill/kg/CH</i>
	Demolição piso em madeira	15573,31	kg	<i>disposal, building, waste wood, untreated, to final disposal/kg/CH</i>
	Transporte de entulho*	199,85	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
	Grana de mármore	695,90	kg	<i>gravel, crushed, at mine/kg/CH</i>
Pisos	Cimento branco	347,95	kg	<i>cement, unspecified, at plant/kg/CH</i>
	Argamassa colante	335,66	kg	<i>adhesive mortar, at plant/kg/CH</i>
	Mármore	7810,64	kg	<i>natural stone plate, polished, at regional storage/kg/CH</i>

Continua na página seguinte.

Tabela D.2 – Composições, quantitativos e processos envolvidos no restauro e manutenção do edifício existente

	Composição	Quantidade	Un.	Processo na base ecoinvent v. 2.2
Pisos	Argamassa colante	869,89	kg	<i>adhesive mortar, at plant/kg/CH</i>
	Cerâmica	3479,55	kg	<i>ceramic tiles, at regional storage/kg/CH</i>
	Água	699,07	kg	<i>tap water, at user/CH U</i>
	Reexecução piso madeira	21,63	m ³	<i>sawn timber, hardwood, planed, air/kiln dried, u=10%, at plant/m³/RER</i>
	Transporte de materiais	14708,11	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
Revestimento externo	Remoção pintura reboco	3713,79	kg	<i>disposal, building, paint on walls, to final disposal/kg/CH</i>
	Demolição reboco	238364,38	kg	<i>disposal, building, cement (in concrete) and mortar, to final disposal/kg/CH</i>
	Demolição pedra/mármore	9082,66	kg	<i>disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill/kg/CH</i>
	Demolição arg. de assentamento	13004,71	kg	<i>disposal, building, cement (in concrete) and mortar, to final disposal/kg/CH</i>
	Transporte de entulho*	227,07	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
	Repintura sobre reboco	4369,16	kg	<i>alkyd paint, white, 60% in H₂O, at plant/kg/RER</i>
	Transporte de materiais	3062,78	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
	Pedrisco	31025,21	kg	<i>gravel, crushed, at mine/kg/CH</i>
	Areia média	118695,73	kg	<i>silica sand, at plant/kg/DE</i>
	Cimento Portland CP II-E-32	32738,62	kg	<i>cement, unspecified, at plant/kg/CH</i>
	Argamassa industrializada	21801,89	kg	<i>cement mortar, at plant/kg/CH</i>
	Argamassa colante	536,70	kg	<i>adhesive mortar, at plant/kg/CH</i>
	Água	24784,74	kg	<i>tap water, at user/CH U</i>
	Revestimento mármore	3041,58	kg	<i>natural stone plate, polished, at regional storage/kg/CH</i>
	Revestimento pedra natural	9447,08	kg	<i>natural stone plate, cut, at regional storage/kg/CH</i>
	Transporte de materiais	97840,70	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>

Continua na página seguinte.

Tabela D.2 – Composições, quantitativos e processos envolvidos no restauro e manutenção do edifício existente

	Composição	Quantidade	Un.	Processo na base ecoinvent v. 2.2
Revestimento interno	Remoção pintura reboco	9975,22	kg	disposal, building, paint on walls, to final disposal/kg/CH
	Demolição reboco	576725,29	kg	disposal, building, cement (in concrete) and mortar, to final disposal/kg/CH
	Demolição mármore	1259,54	kg	disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill/kg/CH
	Demolição argamassa de assentamento	1803,44	kg	disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill/kg/CH
	Transporte de entulho*	31,49	tkm	transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH
	Repintura sobre reboco	11735,55	kg	alkyd paint, white, 60% in H ₂ O, at plant/kg/RER
	Transporte de materiais	8226,62	tkm	transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH
	Pedrisco	75065,83	kg	gravel, crushed, at mine/kg/CH
	Areia média	287185,65	kg	silica sand, at plant/kg/DE
	Cimento Portland	79211,45	kg	cement, unspecified, at plant/kg/CH
	Argamassa industrializada	53227,33	kg	cement mortar, at plant/kg/CH
	Argamassa colante	74,43	kg	adhesive mortar, at plant/kg/CH
	Água	59630,94	kg	tap water, at user/CH U
	Revestimento mármore	1731,87	kg	natural stone plate, polished, at regional storage/kg/CH
	Transporte de materiais	196848,92	tkm	transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH
Aberturas externas	Disposição do alumínio	83784,13	kg	disposal, aluminium, 0% water, to sanitary landfill/kg/CH
	Disposição dos vidros	22048,45	kg	disposal, building, glass sheet, to final disposal/kg/CH
	Transporte de entulho*	418,92	tkm	transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH
	Esquadrias de alumínio	2204,85	m ²	window frame, aluminium, U=1.6 W/m ² K, at plant/m ² /RER
	Vidros simples 4mm	22048,45	kg	flat glass, uncoated, at plant/kg/RER
	Transporte de materiais	25721,73	tkm	transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH

Continua na página seguinte.

Tabela D.2 – Composições, quantitativos e processos envolvidos no restauro e manutenção do edifício existente

	Composição	Quantidade	Un.	Processo na base ecoinvent v. 2.2
Portas internas	Demolição portas madeira	18,23	m ²	<i>disposal, building, door, inner, wood, to final disposal/m²/CH</i>
	Remoção tinta residual	53,92	kg	<i>disposal, building, paint remains, to final disposal/kg/CH</i>
	Novas portas em madeira	18,23	m ²	<i>door, inner, wood, at plant/m²/RER</i>
	Transporte de materiais	133,87	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
	Pintura em madeira	35,00	kg	<i>acrylic varnish, 87.5% in H₂O, at plant/kg/RER</i>
	Transporte de materiais	24,53	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
Elementos de sombreamento	Demolição concreto	56485,70	kg	<i>disposal, building, concrete, not reinforced, to final disposal/kg/CH</i>
	Remoção tinta residual	561,51	kg	<i>disposal, building, paint on walls, to final disposal/kg/CH</i>
	Areia	24971,59	kg	<i>silica sand, at plant/kg/DE</i>
	Pedra britada	34922,90	kg	<i>gravel, crushed, at mine/kg/CH</i>
	Cimento Portland CP II-E-32	11051,55	kg	<i>cement, unspecified, at plant/kg/CH</i>
	Água de amassamento	4973,20	kg	<i>tap water, at user/CH U</i>
	Transporte de materiais	29218,50	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
	Pintura sobre concreto	660,60	kg	<i>alkyd paint, white, 60% in H₂O, at plant/kg/RER</i>
	Transporte de materiais	463,08	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>

* Transporte de entulho relativo às distâncias de transporte dos materiais não pertencentes à categoria *disposal, building do ecoinvent*.

D.ii CASO REABILITAÇÃO COM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Na Tabela D.3 encontram-se os quantitativos e relação vida de serviço da edificação / vida útil de cada componente das medidas de

conservação de energia empregados na reabilitação do edifício existente que resultaram em uma redução maior que 1% na demanda de energia para operação da edificação.

Tabela D.3 – Quantitativos, relação vida de serviço da edificação / vida útil do componente e referências das composições das medidas de conservação de energia do edifício existente

Medida de conservação de energia	Quantidade		VS / VU	Referência para construção e reparos/substituições
1 Pintura das paredes externas	12136,56	m ²	8	TCPO 13, composição 09115.8.11.13
4 Película controle solar vidros	2204,85	m ²	5	Área envidraçada do levantamento arquitetônico
5 Esquadrias com vidros laminados	2204,85	m ²	2	Área envidraçada do levantamento arquitetônico
6 Esquadrias com vidros duplos	2204,85	m ²	2	Área envidraçada do levantamento arquitetônico
8 Brise de alumínio na fachada NO	650,00	m ²	2	Projeto baseado em catálogo de fabricante (Sul Metais BSM-84)

Na Tabela D.4 estão indicados os quantitativos das composições envolvidas na implantação e em uma manutenção das medidas de conservação de energia para a reabilitação do edifício existente, de acordo com a unidade indicada no processo da base *ecoinvent 2.2*. O número de manutenções ao longo da vida de serviço do edifício corresponde à relação VS/VU da Tabela D.3 menos uma manutenção (uma vez que o final de vida das edificações não é considerado nas fronteiras do sistema).

Tabela D.4 – Composições, quantitativos e processos envolvidos na implantação e manutenção das medidas de conservação de energia do edifício existente

	Composição	Quantidade	Un.	Nome do processo na base <i>ecoinvent</i> v. 2.2
	Remoção tinta residual	3713,79	kg	<i>disposal, building, paint remains, to final disposal/kg/CH</i>
1	Repintura	4369.16	kg	<i>alkyd paint, white, 60% in H₂O, at plant/kg/RER</i>
	Transporte materiais	3062.78	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
	Remoção película de controle solar	926,04	kg	<i>disposal, building, polyethylene/polypropylene products, to final disposal/kg/CH</i>
4	Polycarbonato	926.04	kg	<i>polycarbonate, at plant/kg/RER</i>
	Fabricação de filme	926.04	kg	<i>extrusion, plastic film/kg/RER</i>
	Transporte materiais	456.54	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
	Disposição do alumínio	83784.13	kg	<i>disposal, aluminium, 0% water, to sanitary landfill/kg/CH</i>
	Disposição dos vidros	57325.98	kg	<i>disposal, building, glass sheet, to final disposal/kg/CH</i>
5	Transporte de entulho*	2094.60	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
	Esquadria em alumínio	2204.85	m ²	<i>window frame, aluminium, U=1.6 W/m²K, at plant/m²/RER</i>
	Vidros laminados	2204.85	m ²	<i>glazing, double (2-IV), U<1.1 W/m²K, laminated safety glass, at plant/m²/RER</i>
	Transporte materiais	39210.97	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
	Disposição do alumínio	83784.13	kg	<i>disposal, aluminium, 0% water, to sanitary landfill/kg/CH</i>
	Disposição dos vidros	44096.91	kg	<i>disposal, building, glass sheet, to final disposal/kg/CH</i>
6	Transporte de entulho*	2094.60	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
	Esquadria em alumínio	2204.85	m ²	<i>window frame, aluminium, U=1.6 W/m²K, at plant/m²/RER</i>
	Vidros duplos	2204.85	m ²	<i>glazing, double (2-IV), U<1.1 W/m²K, at plant/m²/RER</i>
	Transporte materiais	40802.87	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>

Continua na página seguinte.

Tabela D.4 – Composições, quantitativos e processos envolvidos na implantação e manutenção das medidas de conservação de energia do edifício existente

Composição	Quantidade	Un.	Nome do processo na base ecoinvent v. 2.2
Disposição do alumínio	2295.00	kg	<i>disposal, aluminium, 0% water, to sanitary landfill/kg/CH</i>
Transporte de entulho*	57.38	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
8 Matéria-prima alumínio	2295.00	kg	<i>aluminium, production mix, at plant/kg/RER</i>
Manufatura alumínio	2295.00	kg	<i>aluminium product manufacturing, average metal working/kg/RER</i>
Transporte materiais	993.74	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>

* Transporte de entulho relativo às distâncias de transporte dos materiais não pertencentes à categoria disposal, building do ecoinvent.

D.iii CASO NOVA EDIFICAÇÃO TEÓRICA

Conforme definido no escopo da análise comparativa, o ciclo de vida do cenário com nova construção inicia com a demolição do edifício existente seguida da construção da nova edificação. Os quantitativos de cada componente construtivo do edifício existente já foram apresentados na Tabela D.1. A Tabela D.5 expressa os quantitativos de cada composição envolvida na demolição do edifício existente, de acordo com a respectiva unidade indicada no processo da base *ecoinvent 2.2*.

Tabela D.5 – Composições, quantitativos e processos envolvidos na demolição do edifício existente

	Composição	Quantidade	Un.	Processo na base <i>ecoinvent</i> v. 2.2
Estrutura	Concreto armado	5520906,27	kg	<i>disposal, building, reinforced concrete, to final disposal/kg/CH</i>
Alvenaria externa	Bloco cerâmico	1254147,19	kg	<i>disposal, building, brick, to final disposal/kg/CH</i>
	Argamassa de assentamento	1615904,64	kg	<i>disposal, building, cement (in concrete) and mortar, to final disposal/kg/CH</i>
Alvenaria interna	Bloco cerâmico	323979,43	kg	<i>disposal, building, brick, to final disposal/kg/CH</i>
	Argamassa de assentamento	196438,10	kg	<i>disposal, building, cement (in concrete) and mortar, to final disposal/kg/CH</i>
Cobertura	Estrutura madeira	10428,44	kg	<i>disposal, building, waste wood, untreated, to final disposal/kg/CH</i>
	Ferragens	85,59	kg	<i>disposal, building, bulk iron (excluding reinforcement), to sorting plant/kg/CH</i>
	Telha fibrocimento	11376,48	kg	<i>disposal, building, cement-fibre slab, to final disposal/kg/CH</i>
Pisos	Argamassa de regularização	692525,61	kg	<i>disposal, building, cement (in concrete) and mortar, to final disposal/kg/CH</i>
	Granilite	5219,22	kg	<i>disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill/kg/CH</i>
	Pedra natural	18934,89	kg	<i>disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill/kg/CH</i>
	Cerâmica	15816,12	kg	<i>disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill/kg/CH</i>
	Madeira	77866,56	kg	<i>disposal, building, waste wood, untreated, to final disposal/kg/CH</i>
	Transporte de entulho*	999,26	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>

Continua na página seguinte.

Tabela D.5 – Composições, quantitativos e processos envolvidos na demolição do edifício existente

	Composição	Quantidade	Un.	Processo na base ecoinvent v. 2.2
Revestimentos externos	Pintura sobre reboco	3713,79	kg	<i>disposal, building, paint on walls, to final disposal/kg/CH</i>
	Argamassa de reboco	1191821,90	kg	<i>disposal, building, cement (in concrete) and mortar, to final disposal/kg/CH</i>
	Pedra natural/mármore	45413,28	kg	<i>disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill/kg/CH</i>
	Argamassa de assentamento	65023,56	kg	<i>disposal, building, cement (in concrete) and mortar, to final disposal/kg/CH</i>
	Transporte de entulho*	1135,33	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
Revestimentos internos	Argamassa de reboco	2883626,43	kg	<i>disposal, building, cement (in concrete) and mortar, to final disposal/kg/CH</i>
	Pedra natural/mármore	6297,72	kg	<i>disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill/kg/CH</i>
	Argamassa de assentamento	9017,19	kg	<i>disposal, building, cement (in concrete) and mortar, to final disposal/kg/CH</i>
	Transporte de entulho*	157,44	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
	Pintura sobre reboco	9975,22	kg	<i>disposal, building, paint on walls, to final disposal/kg/CH</i>
Aberturas	Aberturas externas	83784,13	kg	<i>disposal, aluminium, 0% water, to sanitary landfill/kg/CH</i>
	Vidro simples 4mm	22048,45	kg	<i>disposal, building, glass sheet, to final disposal/kg/CH</i>
	Transporte de entulho*	2094,60	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
	Portas em madeira	91,14	m ²	<i>disposal, building, door, inner, wood, to final disposal/m²/CH</i>
	Pintura sobre madeira	67,40	kg	<i>disposal, building, paint on wood, to final disposal/kg/CH</i>
Brises	Concreto armado	282428,50	kg	<i>disposal, building, reinforced concrete, to final disposal/kg/CH</i>
	Pintura sobre concreto	561,51	kg	<i>disposal, building, paint on walls, to final disposal/kg/CH</i>

* Transporte de entulho relativo às distâncias de transporte dos materiais não pertencentes à categoria disposal, building do ecoinvent.

Na Tabela D.6 estão indicados os quantitativos de cada componente construtivo para construção e manutenção da nova edificação teórica, de acordo com a unidade empregada nas fontes que serviram de referência para as composições de materiais. A tabela apresenta ainda a relação vida de serviço da edificação / vida útil de cada componente.

Tabela D.6 – Quantitativos, relação vida de serviço da edificação / vida útil do componente e referências das composições para a construção e manutenção da nova edificação teórica

	Componente	Quantidade	Un.	V.S. / V.U.	Composições para construção e reparos/substituições
Estrutura	Baldrame	280,02	m ³	1	TCPO13, demanda usual média pelos serviços de armação e concretagem para a execução de estrutura de concreto armado relativa a 1 m ² de construção
	Par. cortina	17,54	m ³		
	Pilares	693,89	m ³		
	Vigas	99,29	m ³		
	Lajes	1152,16	m ³		
	Escadas	30,86	m ³		
	Ático	3,17	m ³		
Alvenarias	Paredes externas	16063,98	m ²	1	TCPO 13, composição 04211.8.2.19. Paredes ext. e int. de 1/2 bloco 9x9x19cm, junta 12mm
	Paredes internas	6259,12	m ²	2	
Cobertura	Estrutura em madeira	6,72	m ³	2	TCPO 13, composição 06110.8.3.4
	Telha fibrocimento	658,36	m ²	3	TCPO 13, composição 07320.8.8.4
	Isolamento térmico	658,36	m ²	5	TCPO 13, composição 07220.8.1.7
	Pintura sobre fibrocimento	658,36	m ²	8	TCPO 13, composição 09115.8.5.1
Pisos	Contrapiso	7566,15	m ²	1	TCPO 13, composição 09605.8.1.1
	Cerâmica	7566,15	m ²	3	TCPO 13, composição 09606.8.2._

Continua na página seguinte.

Tabela D.7 – Composições, quantitativos e processos envolvidos na construção da nova edificação teórica

	Componente	Quantidade	Un.	V.S. / V.U.	Composições para construção e reparos/substituições
Revestimentos	Reboco ext.	16063,98	m ²	2	TCPO 13, composições 09705.8.12.5, 09705.8.2.2,
	Reboco int.	35924,09	m ²	3	09705.8.3.25 e 09705.8.3.50
	Pintura int.	35924,09	m ²	15	TCPO 13, composição 09115.8.12.2
	Cerâmica fachada	16063,98	m ²	2	TCPO 13, composição 09706.8.1._
Aberturas	Aberturas externas	1119,96	m ²	2	TCPO 13, composição 08520.8.1.3
	Portas em madeira	91,14	m ²	5	TCPO 13, composição 08210.8.7.15
	Pintura em madeira	91,14	m ²	15	TCPO 13, composição 09118.8.9.8

A Tabela D.7 expressa os quantitativos de cada composição envolvida na construção da nova edificação teórica, de acordo com a unidade indicada no processo da base *ecoinvent 2.2*.

Tabela D.7 – Composições, quantitativos e processos envolvidos na construção da nova edificação teórica

	Composição	Quantidade	Un.	Nome do processo na base <i>ecoinvent v. 2.2</i>
Estrutura	Concreto	2039,95	m ³	<i>concrete, normal, at plant/m³/CH</i>
	Armadura de aço	192860,17	kg	<i>reinforcing steel, at plant/kg/RER</i>
	Transporte de materiais	290884,64	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>

Continua na página seguinte.

Tabela D.7 – Composições, quantitativos e processos envolvidos na construção da nova edificação teórica

	Composição	Quantidade	Un.	Nome do processo na base ecoinvent v. 2.2
Alvenarias externas	Bloco cerâmico	1155964,00	kg	<i>brick, at plant/kg/RER</i>
	Argamassa de assentamento	314854,01	kg	<i>cement mortar, at plant/kg/CH</i>
	Água de amassamento	141684,30	kg	<i>tap water, at user/CH U</i>
	Transporte de materiais	212859,30	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
Alvenarias internas	Bloco cerâmico	450406,28	kg	<i>brick, at plant/kg/RER</i>
	Argamassa de assentamento	122678,75	kg	<i>cement mortar, at plant/kg/CH</i>
	Água de amassamento	55205,44	kg	<i>tap water, at user/CH U</i>
	Transporte de materiais	82937,85	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
Cobertura	Estrutura madeira	6,72	m³	<i>sawn timber, paraná pine (SFM), kiln dried, u=15%, at sawmill/m³/BR</i>
	Produção ao	79,00	kg	<i>steel, low-alloyed, at plant/kg/RER</i>
	Processamento ao	79,00	kg	<i>steel product manufacturing, average metal working/kg/RER</i>
	Transporte de materiais	823,12	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
	Telha fibrocimento	11755,69	kg	<i>fibre cement corrugated slab, at plant/kg/CH</i>
	Transporte de materiais	5101,97	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
	Poliestireno expandido	622,15	kg	<i>polystyrene foam slab, at plant/kg/RER</i>
	Transporte de materiais	279,97	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
	Pintura sobre fibrocimento	170,23	kg	<i>alkyd paint, white, 60% in H2O, at plant/kg/RER</i>
	Transporte de materiais	140,39	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>

Continua na página seguinte.

Tabela D.7 – Composições, quantitativos e processos envolvidos na construção da nova edificação teórica

	Composição	Quantidade	Un.	Nome do processo na base ecoinvent v. 2.2
Pisos	Argamassa de regularização	226,98	m3	<i>cement mortar, at plant/kg/CH</i>
	Água de amassamento	167514,54	kg	<i>tap water, at user/CH U</i>
	Transporte de materiais	43926,03	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
	Argamassa colante	33,291,06	kg	<i>adhesive mortar, at plant/kg/CH</i>
	Água de amassamento	14980,98	kg	<i>tap water, at user/CH U</i>
	Transporte de materiais	34922,92	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
	Cerâmica	144,059,48	kg	<i>ceramic tiles, at regional storage/kg/CH</i>
Revestimento externo	Pedrisco	202406,15	kg	<i>gravel, crushed, at mine/kg/CH</i>
	Areia média	642816,22	kg	<i>silica sand, at plant/kg/DE</i>
	Cimento Portland CP II-E-32	194599,05	kg	<i>cement, unspecified, at plant/kg/CH</i>
	Argamassa de cimento indust.	136543,83	kg	<i>cement mortar, at plant/kg/CH</i>
	Água de amassamento	149014,30	kg	<i>tap water, at user/CH U</i>
	Transporte de materiais	456969,73	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
	Argamassa colante	70681,51	kg	<i>adhesive mortar, at plant/kg/CH</i>
	Água de amassamento	31806,68	kg	<i>tap water, at user/CH U</i>
	Cerâmica	282726,05	kg	<i>ceramic tiles, at regional storage/kg/CH</i>
	Transporte de materiais	70398,79	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>

Continua na página seguinte.

Tabela D.7 – Composições, quantitativos e processos envolvidos na construção da nova edificação teórica

	Composição	Quantidade	Un.	Nome do processo na base <i>ecoinvent v. 2.2</i>
Revestimento interno	Pintura sobre reboco interno	12932,67	kg	<i>alkyd paint, white, 60% in H₂O, at plant/kg/RER</i>
	Transporte de materiais	9065,80	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
	Pedrisco	452643,51	kg	<i>gravel, crushed, at mine/kg/CH</i>
	Areia média	1437538,32	kg	<i>silica sand, at plant/kg/DE</i>
	Cimento Portland CP II-E-32	435184,41	kg	<i>cement, unspecified, at plant/kg/CH</i>
	Argamassa de cimento indust.	294341,95	kg	<i>cement mortar, at plant/kg/CH</i>
	Água de amassamento	328286,86	kg	<i>tap water, at user/CH U</i>
	Transporte de materiais	1020627,85	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
Aberturas externas	Alumínio	1119,96	m ²	<i>window frame, aluminium, U=1.6 W/m²K, at plant/m²/RER</i>
	Transporte de materiais	5404,92	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
	Vidros simples 3mm	8399,69	kg	<i>flat glass, uncoated, at plant/kg/RER</i>
	Transporte de materiais	5745,39	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
Portas internas	Portas em madeira	91,14	m ²	<i>door, inner, wood, at plant/m²/RER</i>
	Transporte de materiais	669,33	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
	Pintura sobre madeira	43,75	kg	<i>acrylic varnish, 87.5% in H₂O, at plant/kg/RER</i>
	Transporte de materiais	30,67	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>

Na Tabela D.8 constam as composições, quantitativos e processos envolvidos em uma manutenção da nova edificação teórica ao longo da sua vida de serviço, de acordo com a unidade indicada no processo da base *ecoinvent 2.2*. Os percentuais de intervenção são os mesmos indicados na Tabela 5.8, e o número de manutenções ao longo da vida de serviço do edifício corresponde à relação VS/VU da

Tabela D.6 menos uma manutenção (uma vez que o final de vida das edificações não é considerado nas fronteiras do sistema).

Tabela D.8 – Composições, quantitativos e processos envolvidos na manutenção da nova edificação teórica

	Composição	Quantidade	Un.	Nome do processo na base <i>ecoinvent v. 2.2</i>
Alvenarias internas	Bloco cerâmico	90,081.26	kg	<i>brick, at plant/kg/RER</i>
	Argamassa de assentamento	24,535.75	kg	<i>cement mortar, at plant/kg/CH</i>
	Água de amassamento	11,041.09	kg	<i>tap water, at user/CH U</i>
	Transporte de materiais	16,587.57	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
Cobertura	Estrutura madeira	1,34	m ³	<i>sawn timber, paraná pine (SFM), kiln dried, u=15%, at sawmill/m³/BR</i>
	Produção aço	15,80	kg	<i>steel, low-alloyed, at plant/kg/RER</i>
	Processamento aço	15,80	kg	<i>steel product manufacturing, average metal working/kg/RER</i>
	Transporte de materiais	164,62	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
	Telha fibrocimento	11755,69	kg	<i>fibre cement corrugated slab, at plant/kg/CH</i>
	Transporte de materiais	5101,97	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
	Poliestireno expandido	622,15	kg	<i>polystyrene foam slab, at plant/kg/RER</i>
	Transporte de materiais	279,97	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
	Pintura sobre fibrocimento	170,23	kg	<i>alkyd paint, white, 60% in H₂O, at plant/kg/RER</i>
	Transporte de materiais	140,39	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
Pisos	Argamassa colante	33,291,06	kg	<i>adhesive mortar, at plant/kg/CH</i>
	Água de amassamento	14980,98	kg	<i>tap water, at user/CH U</i>
	Transporte de materiais	34922,92	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
	Cerâmica	144,059,48	kg	<i>ceramic tiles, at regional storage/kg/CH</i>

Continua na página seguinte.

Tabela D.8 – Composições, quantitativos e processos envolvidos na manutenção da nova edificação teórica

	Composição	Quantidade	Un.	Nome do processo na base ecoinvent v. 2.2
Revestimento externo	Pedrisco	40481,23	kg	<i>gravel, crushed, at mine/kg/CH</i>
	Areia média	128563,24	kg	<i>silica sand, at plant/kg/DE</i>
	Cimento Portland CP II-E-32	38919,81	kg	<i>cement, unspecified, at plant/kg/CH</i>
	Argamassa de cimento industrializada	27308,77	kg	<i>cement mortar, at plant/kg/CH</i>
	Água de amassamento	29802,86	kg	<i>tap water, at user/CH U</i>
	Transporte de materiais	91393,95	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
	Argamassa colante	70681,51	kg	<i>adhesive mortar, at plant/kg/CH</i>
	Água de amassamento	31806,68	kg	<i>tap water, at user/CH U</i>
	Cerâmica	282726,05	kg	<i>ceramic tiles, at regional storage/kg/CH</i>
	Transporte de materiais	70398,79	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
Revestimento interno	Pintura sobre reboco interno	12932,67	kg	<i>alkyd paint, white, 60% in H₂O, at plant/kg/RER</i>
	Transporte de materiais	9065,80	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
	Pedrisco	90528,70	kg	<i>gravel, crushed, at mine/kg/CH</i>
	Areia média	287507,66	kg	<i>silica sand, at plant/kg/DE</i>
	Cimento Portland CP II-E-32	87036,88	kg	<i>cement, unspecified, at plant/kg/CH</i>
	Argamassa de cimento indust.	58868,39	kg	<i>cement mortar, at plant/kg/CH</i>
	Água de amassamento	65657,37	kg	<i>tap water, at user/CH U</i>
	Transporte de materiais	204125,57	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>

Continua na página seguinte.

Tabela D.8 – Composições, quantitativos e processos envolvidos na manutenção da nova edificação teórica

	Composição	Quantidade	Un.	Nome do processo na base <i>ecoinvent v. 2.2</i>
Aberturas externas	Alumínio	1119,96	m ²	<i>window frame, aluminium, U=1.6 W/m²K, at plant/m²/RER</i>
	Transporte de materiais	5404,92	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
	Vidros simples 3mm	8399,69	kg	<i>flat glass, uncoated, at plant/kg/RER</i>
	Transporte de materiais	5745,39	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
Portas internas	Portas em madeira	18,23	m ²	<i>door, inner, wood, at plant/m²/RER</i>
	Transporte de materiais	133,87	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>
	Pintura sobre madeira	43,75	kg	<i>acrylic varnish, 87.5% in H₂O, at plant/kg/RER</i>
	Transporte de materiais	30,67	tkm	<i>transport, lorry 3.5-20t, fleet average/tkm/CH</i>

ANEXO A – FICHA CADASTRAL DO EDIFÍCIO DAS DIRETORIAS NO IPHAN-SC

Ficha M301 – Cadastro de bens

MÓDULO CADASTRO

1. IDENTIFICAÇÃO			
1.1. Recorte Territorial (Identificação da região estudada)			
SANTA CATARINA			
1.2. Recorte Temático (Identificação do tema do estudo)			
PATRIMÔNIO MODERNO BRASILEIRO			
1.3. Identificação do Bem (denominação oficial, denominação popular, outras denominações)			1.4. Código Identificador Iphan
Edifício das Diretorias			
2. LOCALIZAÇÃO DO UNIVERSO/ OBJETO DE ANÁLISE			
2.1.UF		2.3.Localidade	
SC		Barro Branco	
2.2.Município		2.4.Endereço Completo (logradouro, nº, complemento)	
Florianópolis		Rua Tenente Silveira, 162	
		2.5.Código Postal	
		88010-300	
2.6.Coordenadas Geográficas		3.PROPRIEDADE	
Latitude		3.1 Identificação do Proprietário	
27° 35' 45.24" S		Pública	
Longitude		Privada	
48° 33' 3.96" W		Mista	
Altitude [m]		3.2 Contatos	
Erro Horiz. [m]		Outra	
4.NATUREZA DO BEM		5.CONTEXTO	
Bem arqueológico		Rural	
Bem paleontológico		X Urbano	
Patrimônio natural		Entorno preservado	
X Bem imóvel		Entorno alterado	
Bem móvel		Forma conjunto	
Bem integrado		Bem isolado	
4.1 Classificação		6.PROTEÇÃO EXISTENTE	
		Patrimônio mundial	
		Federal/ individual	
		Federal/ conjunto	
		Estadual/ individual	
		Estadual/ conjunto	
		Municipal/ individual	
		Municipal/ conjunto	
		Entorno de bem protegido	
		7. PROTEÇÃO PROPOSTA	
		Patrimônio mundial	
		Federal/ individual	
		Federal/ conjunto	
		Estadual/ individual	
		Estadual/ conjunto	
		Municipal/ individual	
		Municipal/ conjunto	
		Entorno de bem protegido	
8.ESTADO DE PRESERVAÇÃO		9.ESTADO DE CONSERVAÇÃO	
Integro		X Nenhuma	
Pouco alterado		6.1 Tipo/ legislação incidente	
Muito alterado		7.1 Tipo/ legislação incidente	
Descaracterizado			
10. IMAGENS (copiar quantas linhas forem necessárias)			
			
11.DADOS COMPLEMENTARES			
11.1 Informações Históricas (síntese)			
<p>Edificação pública estadual, projetada pelo engenheiro Domingos Trindade em 1963 e inaugurada em 1961. O prédio do Ministério da Educação e Saúde é citado em diversas pesquisas como referencial para o projeto, tendo em vista sua lógica funcionalista na distribuição dos espaços e sua formalização espacial, com os elementos projetuais característicos (estrutura independente, pilotis desempenhando sua função urbana, criando espaço diferenciado de circulação e estar, abrigado em marquise aludindo às formas livres de Niemeyer, à época, brises completamente posicionados, marcação volumétrica das diferentes fachadas). É um dos marcos do modernismo em Florianópolis. Possui 11 pavimentos sobre pavimento térreo com pé-direito duplo e subsolo. É composto por dois volumes, formando um "L".</p>			
11.2 Outras informações (especializadas, temáticas...)			
<p>Informações e imagens retiradas de PMFL0014 e PMSC001.</p> <p>CASTRO, Eloah Rocha Monteiro de. Edifício das Diretorias: emblema modernista em Florianópolis. Disponível em: <http://www.penodocs.ufsc.br/index.php/esboços/article/view/521> Acesso jan. 2011.</p> <p>TEIXEIRA, Luiz Eduardo Fontoura. <i>Arquitetura e cidade: A modernidade (possível) em Florianópolis, Santa Catarina – 1930-1960</i>. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 2009.</p>			
12. PREENCHIMENTO			
12.1. Entidade		12.2. Data	
12.3. Responsável			
Leticia Bauer		07/06/2011	



ANEXO B – MODELAGEM DA AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DE CICLO DE VIDA PELO MÉTODO *RECiPe*

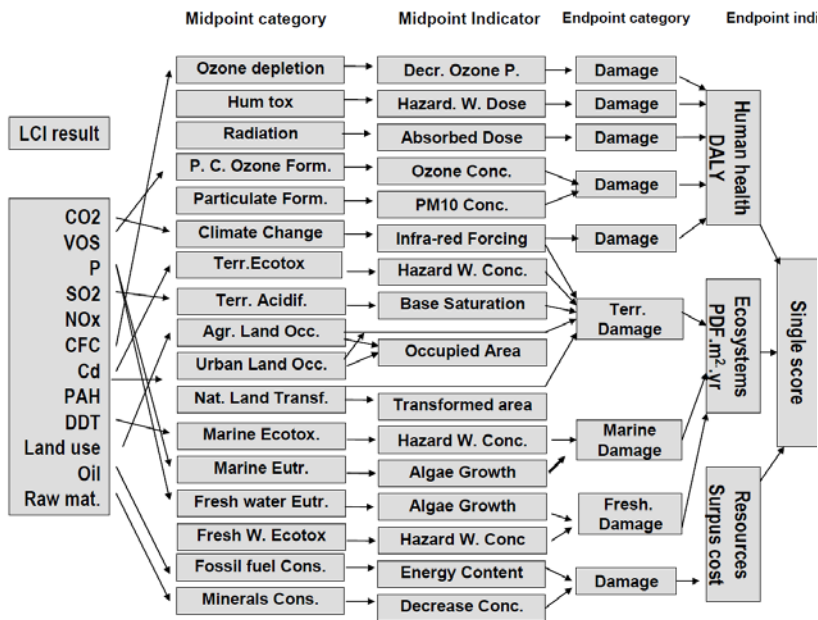


Figura B.1 - Relações entre os parâmetros do inventário de ciclo de vida, os indicadores *midpoint* e os indicadores *endpoint* no *ReCiPe*.
 Fonte: (GOEDKOOPE; HEIJUNGS; HUIJBREGTS; SCHRYVER; *et al.*, 2012).

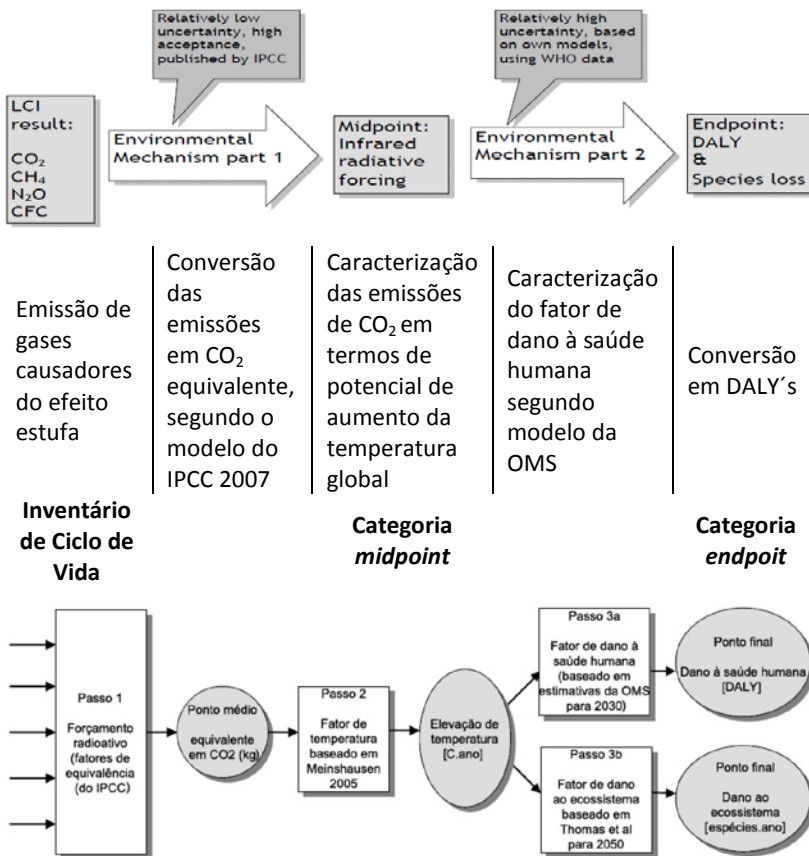


Figura B.2 – Exemplo da modelagem no *ReCiPe* dos efeitos dos gases do efeito estufa e de seu impacto nas mudanças climáticas.

Fonte: Adaptado de Goedkoop *et al.* (2012) e Lange e Ugaya (2011).